

Université Cadi Ayyad

Faculté des Sciences et Techniques Marrakech



Département des Sciences de la Terre
Laboratoire Géoressources
Unité Associée au CNRST (URAC 42)

Université Cadi Ayyad
Faculté des sciences Semlalia
Marrakech



Mémoire de Fin d'études

Master Sciences et Techniques

Eau et Environnement



Caractérisation Hydrogéochimique des eaux de la nappe aquifère de Tinzouline (Drâa, Maroc)

Par :

SAKHO ABDOULAYE DJIBY

Soutenu le 18 Octobre 2011 devant la commission d'examen composée de :

N. LEFTOUHI (FSSM, Marrakech)
A. BENKADDOUR (FSTG, Marrakech)
A. RHOUIJATI (FSTG, Marrakech)
A. BACHNOU (FSTG, Marrakech)

Encadrant
Encadrant
Examinateur
Examinateur

2010/2011

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A mon père Djiby Mamadou Sakho,

A ma mère Binta Djogo,

A mes frères

Wagui Demba Sakho, abdrahamna demba sakho

, Abdoulaye Oumar, Youssfa adama Babiyel sakho Demba djiby sakho, Abdrahamana djiby

Cheikha oumar, Moussa sidibe Massiré Oumar Sakho. Sandigue djiby sakho

A mes soeur Peinda Djiby Sakho, Coumba Chikho, salimata sakho

A mes amis

Diariétou Harouna Diarra

Massatou fade

Sinde demba camara

Oumar souleyemana sy

Said Abdallah Cheihani

SaidAhamed

Abdrahamana ana, Malike samba

Mourviy Mint ahamed

A Tous ceux qui me sont chers,

Et à tous ceux qui de près ou de loin ont œuvré à la réalisation de ce mémoire ou m'ont soutenu ou encouragé durant toutes mes études.

AVANT PROPOS

Ce travail est une ébauche de modèle hydrogéologique conceptuel et sur la caractérisation hydro chimique de la nappe de l'oasis de Tinzouline au sud-est du Maroc. Il en va de soi de traiter le sujet sur deux grandes parties :

- Une sur la caractérisation chimique
- Une autre sur le comportement hydrodynamique

Ce qui fait que nous sommes deux à être confiés à le faire. C'est donc la partie caractérisation chimique qui figurera dans ce présent travail. La seconde partie est traitée simultanément à celle-ci, par Mr Said Abdallah CHEIHANI en fin d'études de Master Géodynamique Géoressources et Environnement Faculté des Sciences Semlalia.

Je tiens à lui présenter mes vives reconnaissances de m'avoir supporté dans ce projet tout au long de la durée du stage de recherche.

Ce travail a bénéficié du support de collaboration entre la Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech et l'Agence du Bassin Hydraulique du Souss Massa Drâa, délégation du Drâa à Ouarzazate. Il a bénéficié également du soutien analytique du centre d'analyses et de caractérisation (CAC) de l'Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech.

REMERCIEMENTS

C'est avec beaucoup de plaisir que je tiens, en terminant ce mémoire, à remercier toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation

J'exprime tout d'abord mes gratitudee à Mr AbdelFattah Benkaddour professeur à la faculté des sciences techniques de Marrakech d'avoir dirigé ce travail. je le remercie pour tous les conseils judicieux, pour le temps qu'il m'a consacré au cours de l'élaboration de ce travail

J'adresse mes remerciements les plus sincères à N. Laftouhi professeur à la faculté des Sciences de Semlalia de Marrakech pour l'honneur de m'avoir donné ce travail et d'avoir accepté de m'encadrer. Il m'a fait bénéficier au cours de mes recherches, de ses larges connaissances et sa grande expérience. Je le remercie vivement pour sa disponibilité.

Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadrant Nouridine khalil professeur à la faculté des Sciences de semlalia de Marrakech d'avoir accepté de diriger ce travail. Je le remercie infiniment de sa gentillesse, ses conseils précieux ainsi que pour la disponibilité dont il a su faire preuve.

Je remercie également Monsieur SABBAR, chef du Service des Ressources en Eau à Ouarzazate ainsi qu'à son personnel pour tout le confort qu'ils m'ont accordé au sein de leur service. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude

Mes remerciements sont adressés à tous le personnel de la faculté des sciences et techniques de Marrakech notamment tous les enseignants qui ont pus intervenir dans mon cursus universitaire et tous ceux qui ont participé, de près ou de loin à ma formation

Mes remerciements sont adressés aussi au personnel du CAC de la FSSM, Prof. Auhmani, Melle Laila el Gaini et Melle Chaima

Je remercie Monsieur Bakary Mohamed SEMEGA, professeur à la faculté des sciences et techniques de Nouakchott, coordinateur de la filière M.G.E,

Je remercie sincèrement Mr RHOJJATI A, et Mr BACHNOU A. professeurs à la faculté des sciences techniques de Marrakech pour avoir accepté de lire et d'évaluer mon rapport

Enfin je remercie toutes les personnes physiques ou morales qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Table de matières :

Liste des tableaux	8
I. INTRODUCTION.....	9
II. CADRE GENERAL	11
II.1. Situation géographique	11
II.1.1. Le Bassin du Haut et Moyen Drâa	11
II.1.2. Rôle de l'agence du Bassin Hydraulique de Souss Massa Drâa dans la région	13
II.2. Cadre géologique de Draa Moyen.....	13
II.2.1. Stratigraphie	13
II.2.2. L'Adoudounien ou Infracambrien.....	14
II.2.3. Le Cambrien	14
II.2.4. L'Ordovicien	14
II.2.5. Le Silurien et le Dévonien.....	15
II.2.6. Le Quaternaire	15
II.3. Cadre structural et tectonique.....	16
II.4. Hydrographie du Bassin du Haut et Moyen Drâa	18
II.5. Cadre climatique de Draa Moyen.....	21
II.5.1. Précipitations dans le Bassin de Draa	21
II.5.2. Evaporation	23
II.6. Hydrogéologie du Bassin du Draa	24
II.6.1. Nappes phréatiques du Quaternaire	27
II.6.2. Nappes du socle.....	28
III. APPORTS DE L'HYDROCHIMIE.....	30
III.1. Méthodologie :	30
III.1.1. Travail In situ.....	30
III.1.2. Travail réalisé au laboratoire	31
III.2. les Résultats	34
III.2.1. Qualités des analyses.....	34
III.2.2. Minéralisation des eaux de surface	36
III.2.2.2.1. Projection des analyses des eaux de surface sur le diagramme de Piper	38
III.2.2.2.2. Projection Des Analyses Des Eaux De Surface Sur Le Diagramme Scholler :	39
III.2.3. Minéralisation des eaux souterraines	41

III.2.3.3.1. Répartition des chlorures dans les eaux souterraine de Tinzouline	44
III.2.3.3.2. Répartition des sulfates dans les eaux souterraines de l'Oued Draa	45
III.2.3.3.3. Répartition du magnésium dans les eaux souterraines de l'Oued Draa	47
III.2.3.3.4. Répartition des bicarbonates dans les eaux souterraine de l'Oued Draa	48
III.2.3.3.5. Répartition des calciums dans l'aquifère	48
III.2.3.4.1. Projection des analyses des eaux de puits :	51
III.2.3.4.2. Projection des analyses des eaux de puits sur le diagramme Berkalof f-Scholl..	52
III.2.3.6.1. Principe d'ACP	59
III.2.3.6.2. Résultats	59
III.3. Conclusion	61
IV. Qualité chimique des eaux.....	61
IV.1. Qualité chimique des eaux surface	61
IV.1.1. Qualité de l'eau destinée à la consommation humaine	62
IV.1.2. Qualité de l'eau destinée à l'irrigation	62
IV.1.3. Qualité de l'eau destinée à l'élevage.....	64
IV.2. Qualité chimiques des eaux souterraines	64
IV.2.1. Qualité d'eau destinée à la consommation humaine	64
IV.2.2. Aptitudes de l'eau à l'irrigation	66
IV.2.3. Qualité de l'eau destinée à l'élevage	67
IV.3. CONCLUSION	67
V. Conclusion générale	69

Table d'illustrations :

Fig. 1 : Carte du bassin du haut et moyen Drâa (Klose, 2009)..... 12

Fig. 2 : Extrait de la carte géologique et structurale du Drâa Moyen, Quaternaire 17
(Feuille Ouarzazate 1 :500000)..... 17

Fig. 3 : Carte hydrographique du Bassin du Haut et Moyen Drâa (IMPETUS, 2008)..... 19

Fig. 4 : Profil topographique des 13 stations météorologiques d'IMPETUS (IMPETUS, 2008) . 22

Fig. 5 : Carte de précipitations annuelles du Bassin du Haut et Moyen Drâa (Klose. 2009)..... 22

Fig. 6 : Situation géographique des palmeraies. 25

Fig. 7 : Carte hydrogéologique du bassin du Haut et Moyen Drâa (IMPETUS, 2008)..... 26

Fig. 8 : Carte lithologique du bassin du Haut et Moyen Draa (Klose. 2009) 27

Fig. 9 : localisation des points des prélèvements des eaux dans la nappe de Tinzouline (région du Draa Moyen)..... 31

Fig. 10 : Principe de La Chromatographie ionique..... 33

Fig. 11 : Conductivité des eaux de surface et des eaux souterraines de la vallée de Draa en fonction du TDS..... 36

Fig. 12 : Evolution amont- aval des concentrations de quelques éléments chimiques des eaux de surface (Mission du 20 au 21 Mars 2011)..... 37

Fig. 13 : Projection des analyses chimiques des eaux de surfaces de l'Oued Draa sur le diagramme de Piper. 39

Fig. 14 : Projection des analyses des eaux de l'Oued Draa sur le Diagramme de Berkaloff-Scholler 40

Fig. 15 : Carte piézométrique de la nappe de Tinzouline ; campagne piézométrique du 20 au 21 mars 2011 42

Fig. 16 : Carte de conductivité électrique de la nappe de Tinzouline, état de Mars 2011..... 43

Fig. 17 : Carte en isovaleurs des chlorures ; les valeurs à côté des points, représentent les concentrations en mg/l pour chaque échantillon 45

Fig. 18 : Carte en isovaleurs des Sulfates ; les valeurs à côté des points, représentent les concentrations en mg/l pour chaque échantillon 46

Fig. 19 : Carte en isovaleurs du Magnésium ; les valeurs à côté des points, représentent les concentrations en mg/l pour chaque échantillon 47

Fig. 20 : Carte en isovaleurs des bicarbonates; les valeurs à côté des points, représentent les concentrations en mg/l pour chaque échantillon 48

Fig. 21 : Carte en isovaleurs du calcium; les valeurs à côté des points, représentent les concentrations en mg/l pour chaque échantillon 49

Fig. 22 : Relations entre la minéralisation totale (TDS) des eaux souterraines et quelques éléments chimiques de l'aquifère de Tinzouline. 50

Fig. 23 : projection des analyses chimiques eaux souterraines de la nappe de Tinzouline sur diagramme de piper 52

Fig. 24 : Diagramme de Berkaloff-Scholler des eaux de puits de la nappe de Tinzouline..... 53

Fig. 25 : Diagramme de Berkaloff-Scholler des eaux de puits de la nappe de Tinzouline (suite) 54

Fig. 26 : Diagramme de Berkaloff-Scholler des eaux de puits de la nappe de Tinzouline..... 55

Fig. 28 : Diagramme de la classification de l'eau d'irrigation d'oued Draa 63

Fig. 29 : Diagramme de la classification de l'eau d'irrigation des eaux souterraines de la nappe de Tinzouline..... 67

Liste des tableaux

Tab.1: Variables climatiques et index d'aridité, d'après MIDDLETON & THOMAS (1997), des stations météorologiques dans le bassin du Haut et Moyen Drâa (Klose, 2008) (voir localisation Fig. 6).....	23
Tab.2 : Perméabilités du Quaternaire (Chamayou, 1966)	28
Tab.3 : <i>Paramètres physico-chimiques des eaux de surface et souterraines</i> dans la nappe de Tinzouline (<i>Campagne</i> du 20 au 21 mars 2011)	34
TAB.4 : Etat de saturation des eaux de surface de l'Oued Draa durant la période du 20 au 21 Mars 2011	57
Tab.5 : Indices de saturation des eaux souterraines de la nappe de Tinzouline vis-à-vis de l'Halite, gypse, dolomite et calcite	58
Tab.6 : Matrice de corrélations	59
Tab.7 : Norme de potabilité de l'eau de point de vu chimique (normes marocaine et OMS, 2006) et les données de l'analyse effectuées sur les échantillons précédemment cités des eaux de surface de vallée du Moyen Draa	62
Tab.8 : Normes relatives à l'élevage d'après Mckenn and Wolf (In Hem, 1985).....	64
Tab.9 : Norme de potabilité de l'eau de point de vu chimique (normes marocaine et OMS en 2006) et les données de l'analyse effectuées sur les échantillons précédemment cités des eaux souterraines de la nappe de Tinzouline	65

Acronymes

TDS : éléments totaux dissouts

OMS : Organisation le de la Santé

SAR : rapport d'absorption du sodium

ACP : Analyses en composante principale

IS : l'indice de saturation

I. INTRODUCTION

La zone d'étude se situe dans le système hydrologique du Bassin de l'Anti-Atlas, système où de nombreuses études ont été faites dans le cadre du projet entre le Maroc et l'Allemagne (IMPETUS, 2000 à 2009). Au cours de ce projet, plusieurs études ont été réalisées autour de l'Oued Draa, principal oued du bassin de l'Anti-Atlas. L'Oued Draa est un important fleuve qui coule de la montagne de l'Atlas vers le Sahara. Il alimente six palmeraies, depuis le Barrage El-Mansour Dahbi jusqu'au M'Hamid au sud de la ville de Zagora, séparées par des Foums caractérisés par des petites remontées du socle schisteux. Les six oasis sont, de l'amont vers l'aval, Mezguita, Tinzouline, Fezouata, Ternata, Ktaoua et M'Hamid. Il faut rajouter que l'Oued Drâa a fait l'objet d'une thèse, par J. Chamayou (1966), qui présente un parfait détail du fonctionnement du bassin hydrologique dans la partie médiane.

L'Oasis de Tinzouline qui fait l'objet de cette étude, est la deuxième des six oasis précédemment citées.

La nappe aquifère qui siège dans l'oasis de Tinzouline, comme toutes les cinq autres, est alimentée par un drainage par canalisation, en système de lâchers de barrage. Ces derniers sont réalisés sept fois dans l'année, dans le but de relever le niveau des nappes tout au long de l'oued Drâa et d'alimenter en eau d'irrigation les six palmeraies. Le but est atteint, mais avec une croissance démographique et un développement socio-économique galopant, la région connaît une crise liée à la surexploitation des eaux. Ceci est aggravé par la forte variabilité climatique régnant dans la région qui fait que l'eau se fait de plus en plus rare.

La quasi-totalité des points d'eau de l'aquifère sont destinés à l'alimentation en eau Potable et à l'irrigation des terres agricoles. Pour être utilisée l'eau doit répondre à des normes qui varient en fonction du type d'utilisation. Dans ce but et dans le cadre de cette étude, une campagne d'échantillonnage a porté sur une trentaine de points d'eau captant l'aquifère de Tinzouline et ses régions. Les points d'eau concernés sont régulièrement repartis sur l'ensemble de la région étudiée. La campagne a été réalisée durant le mois de mars 2011.

Les principaux objectifs de l'étude chimique des eaux sont de :

- Caractériser la chimie des eaux de l'aquifère de Tinzouline ;
- Tenter de déterminer l'origine de la salinité des eaux ;
- Suivre l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques ;
- Évaluer la qualité chimique des eaux de la région.

II. CADRE GENERAL

II.1. Situation géographique

La nappe aquifère de Tinzouline se situe dans le bassin de Draa et plus particulièrement dans le Haut et Moyen Drâa, à cheval entre les provinces d'Ouarzazate et Zagora dans le sud du Maroc. (Fig. 1)

II.1.1. Le Bassin du Haut et Moyen Drâa

L'unité du haut et moyen Drâa, à laquelle appartient l'oasis de Tinzouline, s'étend sur une superficie totale de 29.500 km². Elle correspond au haut bassin de l'Oued Draa situé en amont du barrage Mansour Eddahbi et à la moyenne vallée du Draa irriguée à partir de ce barrage jusqu'au niveau de M'hamid.

Administrativement, cette unité couvre une grande partie des provinces d'Ouarzazate et de Zagora. La population de ce sous bassin s'élève à 616.000 habitants dont 82% en milieu rural. La population rurale est très concentrée dans les périmètres irrigués. A l'horizon 2020, la population de cette zone serait de 807.544 habitants dont 65% en milieu rural. Le climat est très aride. Il est caractérisé par des hivers rigoureux (entre - 7°C et -1°C) et des étés chauds (40°C).

La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 300 mm dans le massif du haut Atlas, 200 mm dans les vallées, 120 mm sur le plateau d'Ouarzazate, et 60 mm à Zagora. Les périodes pluvieuses s'étalent entre Septembre et Mai et le nombre de jours de pluie varie entre 30 et 40 jours par an. L'évaporation est forte, elle est de l'ordre de 2000 à 3000 mm/an.

L'agriculture à caractère traditionnel et à but substantiel constitue l'activité principale de cette zone, grâce au barrage Mansour Ebdahbi édifié en 1972 et qui régularise les apports relativement abondants et réguliers de l'oued Draa, alimenté à partir des sommets du Haut Atlas. Les provinces d'Ouarzazate et Zagora sont les mieux dotées en ressources. La superficie irriguée est de 26.000 ha dans la vallée entre Agdz et M'hamid.

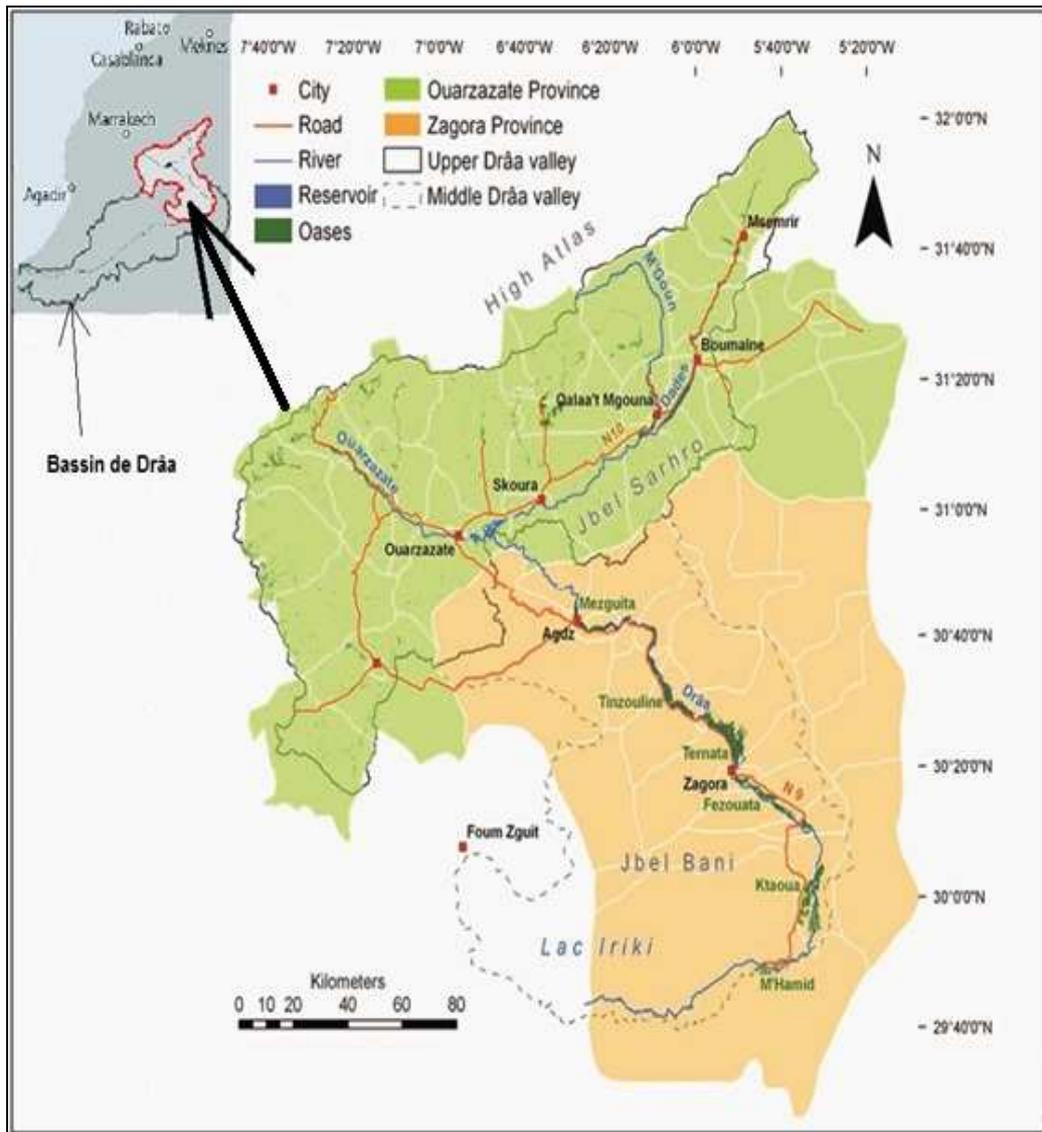


Fig. 1 : Carte du bassin du haut et moyen Drâa (Klose, 2009)

La petite et moyenne hydraulique est concentrée dans les hautes vallées du Dadès, du Mgoun et de l'oued Ouarzazate et concernent une superficie estimée à 18.000 ha. La production agricole est aléatoire et dépend des conditions climatiques qui régissent l'écoulement des oueds et des sources, notamment dans les parties aval des vallées.

Concernant le secteur minier, la zone renferme 5 mines : la Mine d'Imiter (argent), la mine de Bleida (cuivre), la mine de Imini (manganèse), la mine de Tiouit (cupro-auro-argentifère) et la mine de Bouazzer (cobalt-argent-chromite).

Le secteur touristique connaît un grand développement dans la province de Ouarzazate aux sites naturels diversifiés (palmerais, oasis, sable....).

II.1.2. Rôle de l'agence du Bassin Hydraulique de Souss Massa Drâa dans la région

L'Agence du Bassin Hydraulique de Souss Massa Drâa est une institution gouvernementale qui agit pour la gestion des ressources en eau de ladite région. Elle est, comme toutes les autres agences des bassins du royaume, chargée :

- D'élaborer le plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau relevant de sa zone d'action ;
- De veiller à l'application du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau à l'intérieur de sa zone d'action ;
- De réaliser toutes les mesures piézométriques et de jaugeages ainsi que les études hydrologiques, hydrogéologiques, de planification et de gestion de l'eau tant sur le plan quantitatif que qualitatif ;
- De réaliser toutes les mesures de qualité et d'appliquer les dispositions de la présente loi et des lois en vigueur relatives à la protection des ressources en eau et à la restauration de leur qualité, en collaboration avec l'autorité gouvernementale chargée de l'environnement ;
- De proposer et d'exécuter les mesures adéquates, d'ordre réglementaire notamment, pour assurer l'approvisionnement en eau en cas de pénurie d'eau déclarée conformément au chapitre 10 de la présente loi ou pour prévenir les risques d'inondation ;
- De gérer et contrôler l'utilisation des ressources en eau mobilisées ;
- Et d'autres rôles tant économiques, juridiques que sociaux.

II.2. Cadre géologique de Draa Moyen

La vallée du Draa s'est moulée aux constituants géologiques de l'Anti-Atlas et du Bani qu'elle traverse ou longe tour à tour.

II.2.1. Stratigraphie

A partir de Zaouia N'Ourbaz, le Drâa s'encaisse dans les complexes du Précambrien III. La partie ouest du Jbel Saghro est constituée en grande partie de coulées de rhyolites et d'andésites dans lesquelles viennent s'interstratifier des brèches rhyolitiques et des tufs volcaniques. Cet ensemble a été subdivisé en trois complexes repères essentiellement rhyolitiques. La prédominance de roches dures a obligé le Drâa à creuser une gorge étroite et encaissée.

II.2.2. L'Adoudounien ou Infracambrien

Avec cet étage commencent les dépôts sédimentaires de couverture. Deux transgressions successives ont laissé comme témoins les faciès suivants :

- Pour la première, des conglomérats de base peu épais, surmontés de calcaires inférieurs dont la puissance est de 50 m à Agdz et de 150 à 200 m autour du chaînon El-Graara—Bou-Azzer—Zagora ;
- Pour la seconde série transgressive, à la base les grès de Tikkirt dont la puissance atteint son maximum près de Agdz avec 300 m d'épaisseur (équivalent continental des schistes lie-de-vin de l'ouest), surmontés par les « calcaires supérieurs », très réduits dans la vallée du Drâa et dont la puissance est inférieure à 75 m. ces calcaires disparaissent peu à peu vers l'Est en bordure du Saghro.

II.2.3. Le Cambrien

On distingue le Cambrien (géorgien) qui comprend :

- La série schisto-calcaire de 50 à 75 m d'épaisseur,
- Les grès terminaux qui atteignent 175 m d'épaisseur

Le Cambrien moyen (Acadien) qui débute par des schistes à trilobites et se poursuit par une puissante série de grès et quartzites dont l'épaisseur peut atteindre 500 m.

II.2.4. L'Ordovicien

Plusieurs séries ont été différenciées d'après les faunes de graptolithes. La stratigraphie a été définie par Choubert en 1945 et 1952. On distingue :

- Les schistes inférieurs et supérieurs de Fezouata, épais de 500 à 600 m, couronnés par un niveau gréseux.
- Les schistes de Tachilla, épais de 300 à 350 m.
- Les quartzites du premier Bani qui déterminent la crête appalachienne qui longe le Drâa sur plus de 100 km. Leur puissance au Foum Takkat peut atteindre 300 à 350 mètres.
- Les schistes du Ktaoua qui s'intercalent entre les deux chaînes actuelles du Bani et déterminent la cuvette qui supporte la palmeraie du Ktaoua.

- La série gréseuse du second Bani qui, avec un niveau supérieur de schistes, est le dernier cycle sédimentaire de l'Ordovicien, elle constitue une deuxième crête appalachienne.

II.2.5. Le Silurien et le Dévonien

Bien que peu visibles dans la moyenne vallée du Drâa, ces deux étages correspondent à deux séries schisto-gréseuses puissantes qui forment le substrat de la dernière cuvette alluviale (M'Hamid).

II.2.6. Le Quaternaire

Le Quaternaire de la vallée est dans l'ensemble constitué de dépôts qui ne diffèrent que par leur degré de cimentation ou leur granulométrie (conglomérats, alluvions détritiques, limons argilo-sableux).

Les croûtes salines dans les zones d'émergence ou de faible profondeur de nappe, recouvrent les sols d'une pellicule blanchâtre et grumeleuse. Quelques croûtes calcaires zonaires cimentent en surface les regs d'une manière discontinue et sont souvent liées aux ruissellements dans les axes déprimés des regs. Des calcaires lacustres souvent gréseux, issus de l'évaporation de petits lacs temporaires, s'intercalent dans les autres niveaux au sein des terrasses et regs.

Basée sur la méthode morphologique et sur le critère altimétrique, la stratigraphie des niveaux du Quaternaire permet de différencier quatre surfaces topographiques représentant autant de pluviaux.

- L'Amirien ou Quaternaire ancien est l'étage quaternaire le plus ancien connu dans la vallée du Draa, du moins en bordure des palmeraies. Il ne subsiste que sous forme d'îlots sur des buttes du Primaire ou au pied des reliefs, emboîté avec les cônes d'éboulis. Essentiellement conglomératique, il ne diffère du reg moyen que par son altitude de 20 à 30 mètres au-dessus du lit actuel de l'oued.
- Le Tensiftien ou quaternaire moyen forme les vastes étendues rocailleuses que sont les regs et supporte les limons récents des palmeraies. Il comprend des conglomérats, des alluvions détritiques et parfois des grès à ciment calcaire. C'est dans ce niveau et celui du Quaternaire récent, que les nappes aquifères peuvent se développer ; l'altitude relative par rapport à l'oued est au maximum de 10 à 15 mètres, mais le Quaternaire moyen est souvent recouvert par les dépôts récents et actuels.

- Le Soltanien ou Quaternaire récent débute par un épisode détritique important et se poursuit par les limons fins des palmeraies avec une transition limono-graveleuse. C'est au cours de cette période que les schistes non recouvert par les regs ont été érodés et que se sont formés les sables limoneux des feijas. Presque toujours le lit actuel de l'oued est dominé de 5 à 8 m par une falaise limoneuse soltanienne.
- L'Actuel et le subactuel sont formés d'alluvions détritiques qui proviennent du remaniement des dépôts plus anciens et comblent le lit de l'oued. Il faut rattacher à cette époque la formation de dunes des sables particulièrement développées au Sud de Zagora et du M'Hamid, ainsi que les cônes de déjection d'oued, les éboulis au pied de falaise et les croûtes salines.

II.3.Cadre structural et tectonique

La moyenne vallée du Dra est entièrement située dans les domaines géologiques de l'Anti-Atlas et du Ban (fig.2). L'ossature précambrienne de la première chaîne a été recouverte postérieurement de formations sédimentaires plissées au cours de mouvements hercyniens.

Les principales directions de plis peuvent se schématiser en trois orientations principales : la direction atlasique SW-NE, sensiblement parallèle à la chaîne du Haut-Atlas, la direction ougartienne NW-SE qui a modelé le chaînon El-Graara—Bou-Azzer—Zagora et la direction mesétienne quasi méridienne (Choubert, 1952).

Les trois directions hercyniennes se superposent sans se confondre à celles des plis des chaînes précambriennes. Le plissement alpin a conduit à l'établissement d'une surface préhamadienne due aux cycles successifs d'érosion. Une dernière phase villafranchienne vide les lacs hamadiens dans un collecteur unique : le Drâa moyen et provoque la surimposition des oueds par un bombement de fond.

Les cassures importantes, liées aux mouvements tardi-hercyniens, recourent les structures et les directions principales des plis. « L'accident moyen » (Choubert, 1947) visible sur 150 kilomètres prend en écharpe le chaînon El-Graara—Zagora et provoque un graben étroit de 1 à 2 Km conservé en position de synclinal perché au jbel Zagora. Une autre cassure importante est soulignée par des venues de dolérites en dykes. Elle part du flanc sud du Saghro, traverse le Drâa moyen au seuil de Tansikht, et se poursuit dans les séries allant du Précambrien I à l'Ordovicien. D'autres failles nombreuses affectent les séries précambriennes et primaires, se développant plus largement dans le Bani.

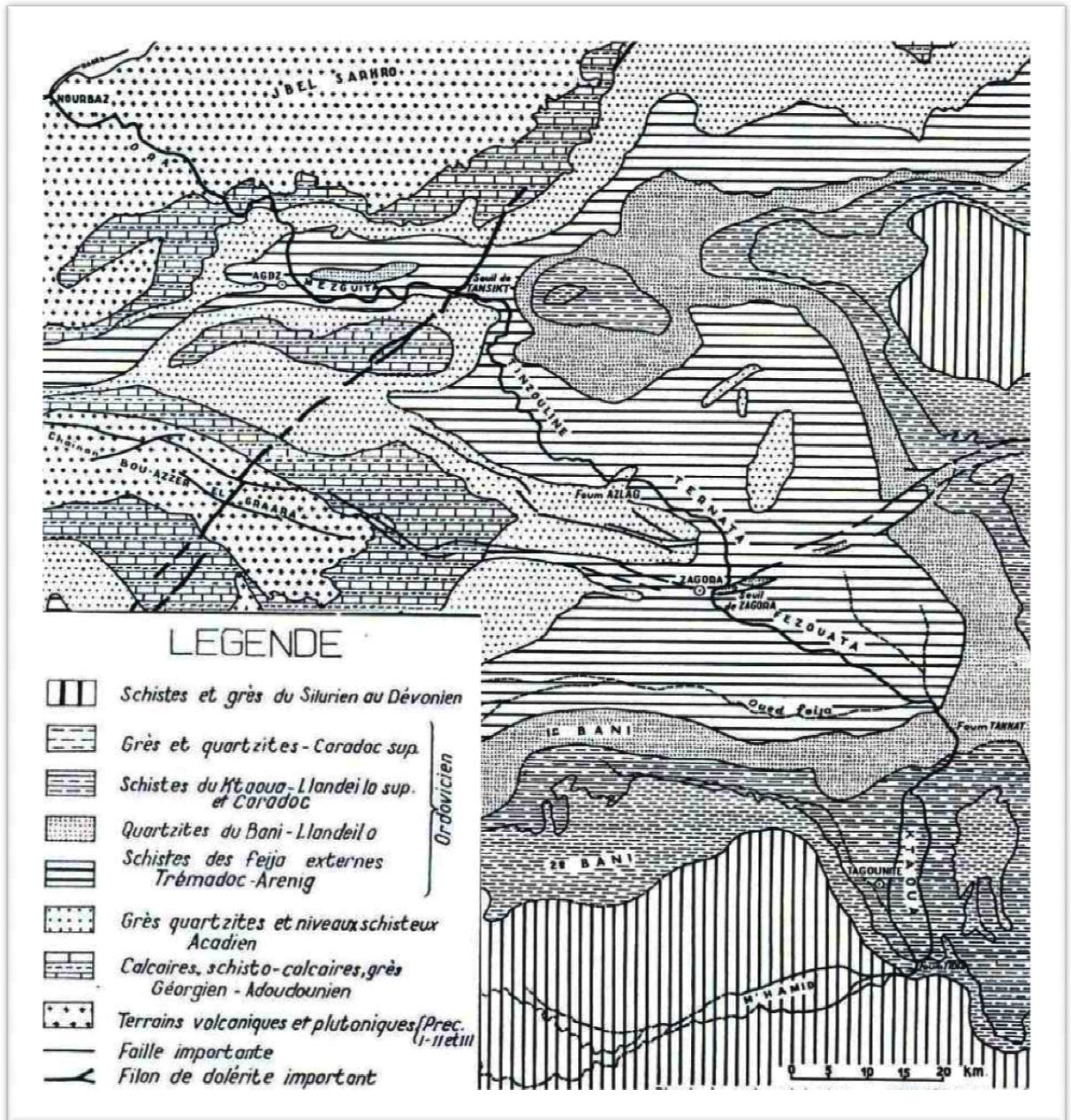


Fig. 2 : Extrait de la carte géologique et structurale du Drâa Moyen, Quaternaire (Feuille Ouarzazate 1 :500000)

II.4. Hydrographie du Bassin du Haut et Moyen Drâa

Le bassin hydrographique du Drâa peut se subdiviser en trois unités importantes (fig.3) :

- Le Drâa inférieur : succède au lac Iriqui, vaste cuvette qui absorbe les eaux des crues importantes et qui peut être considéré comme un exutoire. En fait, les apports de l'Anti-Atlas occidental font naître un Drâa qui n'a pratiquement aucune communication avec le Drâa moyen, si ce n'est au cours de crues très exceptionnelles (Chamayou *et al.*, 1977).
- Le Drâa moyen : Les eaux issues de l'Atlas et du Sillon pré-africain, convergent vers un collecteur commun qui s'est surimposé dans l'Anti-Atlas par une Tarhia de 35Km qui débute à Zaouia N'Ourbaz. Après avoir franchi cette barrière rhyolitique, l'oued débouche sur les schistes du Primaire (Chamayou *et al.*, 1977) où il a pu s'étaler et constituer des terrasses assez larges pour supporter les palmeraies. Les resserments dans les quartzites provoquent une succession de fous qui alternent avec les larges feija ou combes schisteuses. La vallée a dû se surimposer comme dans la tarhia au cours des divers mouvements orogéniques (Chamayou *et al.*, 1977), en décapant une épaisseur de plus de 200 mètres de terrains anciens, donnant au relief du Bani un style de type appalachien.
- Le Drâa supérieur : naît de l'apport des principaux oueds qui sillonnent le bassin de l'oued Ouarzazate et du Dadés. Le Dadés et son principal affluent le M'Goun sont pérennes. L'Oued Ouarzazate qui n'a guère plus de 30Km de long, est formé par trois affluents importants, tous issus de l'Atlas, est semi-pérenne. Ce sont d'est en ouest : le Mellah, L'Imini et le Tiddililiri . La pente moyenne est généralement assez forte : 2% pour l'Ouarzazate et 1,1% pour le Dades et le M'Goun, les minima ne dépassent pas 0,5% (Chamayou *et al.*, 1977).

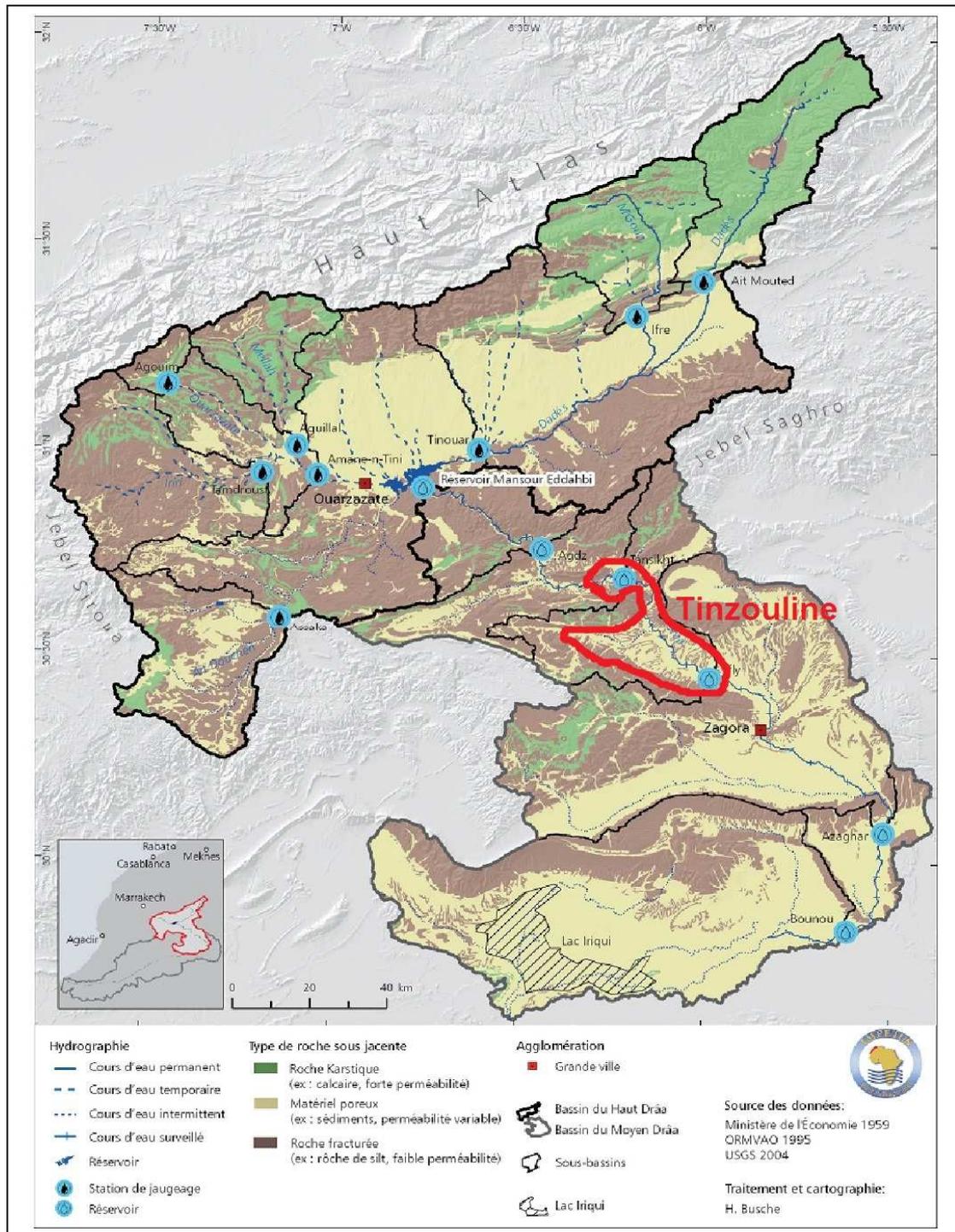


Fig. 3 : Carte hydrographique du Bassin du Haut et Moyen Drâa (IMPETUS, 2008)

La pente moyenne de l'oued Drâa dans la partie cultivée est comprise entre 2.5 et 2 pour mille (Chamayou *et al.*, 1977). Dans les fouds, elle est paradoxalement moins élevée et ne dépasse pas 2 pour mille de moyenne. Cette constatation permet déjà de comprendre le faible rôle de ces cluses dans les échanges entre nappes (Chamayou *et al.* 1977).

L'oued Drâa est pérenne jusqu'aux environs d'Agdz en année sèche. Au cours des années humides, il peut aboutir entre Agdz et Zagora, sans toutefois dépasser ce dernier lieu. Lors de crues importantes, il coule jusqu'au lac Iriqui où les eaux se perdent ; exceptionnellement, celles-ci arrivent jusqu'à l'Océan lors de très fortes crues, dont le débit dépasse 500 m³/s.

Ce régime hydrologique naturel de l'oued Drâa est désormais (depuis 1972) totalement modifié en raison de l'édification du grand barrage d'accumulation de Mansour-Eddahbi situé au site Zaouia N'Ourbaz, à l'entrée des gorges où débute le Drâa moyen. Rares seront maintenant les crues qui atteindront l'Iriqui et les eaux du Drâa ne dépasseront certainement plus ce niveau.

Régime contrôlé par l'homme

En 1972, la construction du réservoir Mansour Eddahbi a été terminée. Depuis lors, le débit d'écoulement dans la Vallée du Drâa Moyen se déroule par portions contrôlées appelées lâchers. Le réservoir répond à trois objectifs:

- Assurer l'irrigation des oasis le long du cours du Drâa,
- Produire de l'énergie hydroélectrique,
- Réduire les risques d'inondation pendant des crues.

Idéalement, sept lâchers, de 35 millions de mètres cubes chacun (Shulz *et al.*, 2008), sont libérés chaque année au cours de la période de production. Tant que ce volume est fourni par la pluie, la disponibilité de l'eau est prévisible et l'usage de l'eau peut être optimisé. La plupart des palmeraies ont leurs propres petits réservoirs, qui sont remplis en commençant par le réservoir Bounou dans le sud et se terminant avec le réservoir Agdz dans le nord. Pour couvrir les périodes entre les lâchers, les eaux souterraines sont utilisées pour l'irrigation, via l'utilisation d'un nombre croissant de motopompes. Dans les années de sécheresse, une petite quantité d'eau est libérée du réservoir pour recharger les systèmes aquifères des oasis. L'eau d'irrigation est alors uniquement tirée à partir des puits.

II.5. Cadre climatique de Draa Moyen

Sur quinze stations de mesures climatiques (13 du Projet IMPETUS et 2 autres supplémentaires (Fig. 4), une variation climatique est observée sur le bassin de Drâa, variant selon l'altitude et la latitude. Ces stations ont permis d'évaluer les totaux annuels de précipitations et évapotranspirations et d'en déduire ensuite l'indice d'aridité pour chaque station (Tab. 1).

II.5.1. Précipitations dans le Bassin de Draa (Schulz et al. 2008)

La variabilité spatio-temporelle des précipitations, y compris les événements extrêmes, affecte la situation hydrologique locale et régionale par la configuration topographique, géologique, pédologique et la couverture végétale. Ainsi, les cartes de précipitation peuvent servir aussi bien d'outils de planification pour l'approvisionnement en eau (agriculture irriguée, eau potable) que de base de données pour des analyses scientifiques et la modélisation régionale du bilan de l'eau, y compris la recharge de la nappe phréatique et les effets différés de la fonte de neige sur la nappe et la recharge de la rivière.

Les cartes de précipitations (Fig. 5) peuvent aider aussi à expliquer les caractéristiques de l'occupation du sol et de l'utilisation des terres.

Les totaux pluviométriques annuels varient de moins de 50mm au sud du bassin du Drâa Moyen à plus de 700mm dans la région de la montagne du Jebel M'Goun. Cela peut être expliqué par la distance croissante de la démarcation météorologique des montagnes du Haut Atlas et une couche superficielle extrêmement sèche dans le promontoire qui provoque l'évaporation des gouttes de pluie avant qu'elles n'atteignent les sols de la vallée. Alors que le bassin entier du Drâa reçoit des précipitations (parfois abondantes) pendant l'interaction atmosphérique tropicale et extra tropicale au printemps et en automne, le Haut Atlas et le bassin du Haut Drâa reçoivent une humidité supplémentaire propagée de l'ouest par les tempêtes hivernales Atlantiques.

Plus en aval, l'effet de «L'ombre de pluie» devient de plus en plus agissant. Dans le bassin du Drâa Moyen, la variabilité des précipitations croît tandis que les précipitations décroissent.

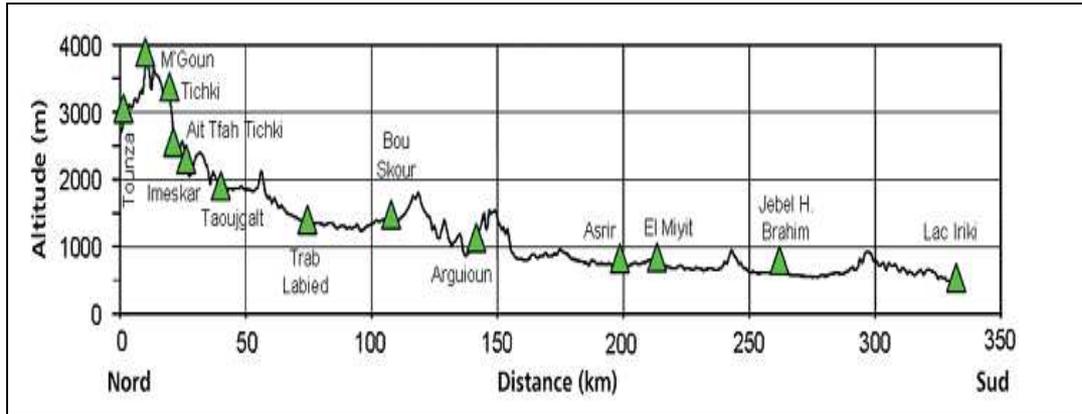


Fig. 4 : Profil topographique des 13 stations météorologiques d'IMPETUS (IMPETUS, 2008)

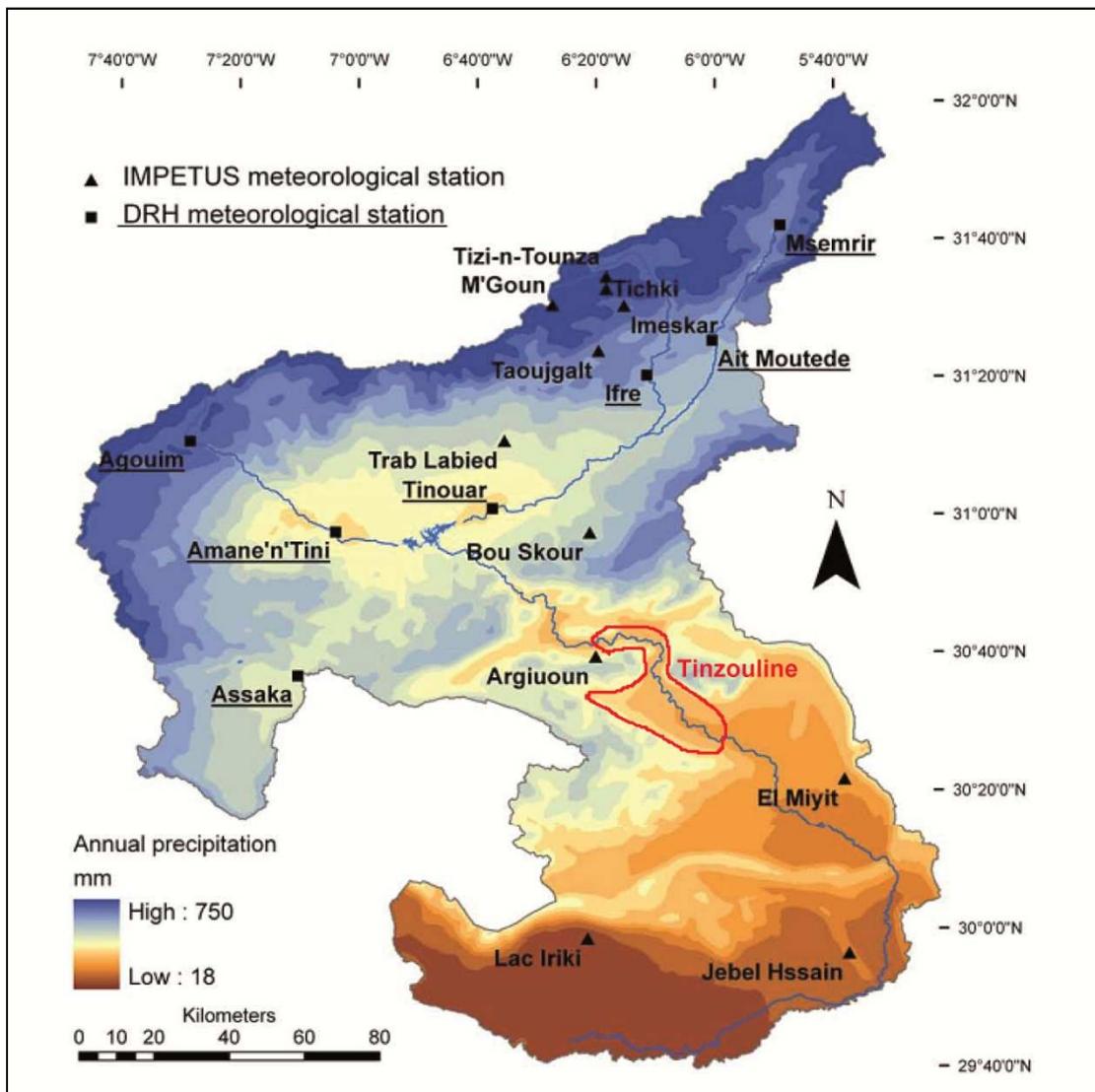


Fig. 5 : Carte de précipitations annuelles du Bassin du Haut et Moyen Drâa (Klose, 2009)

Tab.1: Variables climatiques et index d'aridité, d'après MIDDLETON & THOMAS (1997), des stations météorologiques dans le bassin du Haut et Moyen Drâa (Klose. 2008) (voir localisation Fig. 6)

Station	Altitude [m a.s.l.]	Annual precipitation [mm]	Annual number of raindays	Coefficient of variation of precipitation on raindays	Annual pot. evapotranspiration [mm]	Aridity Index	Aridity class
M'Goun	3850	576	78.3	1.54	1026	0.56	Dry sub-humid
Tichki	3260	443	80.1	1.55	1255	0.35	Semi-arid
Tizi-n-Tounza	2960	296	56.9	1.84	1331	0.22	Semi-arid
Imeskar	2250	290	62.6	1.84	1782	0.16	Arid
Msemrir	1976	199	44.9	1.72	1958	0.10	Arid
Taoujgalt	1870	210	51.8	1.98	1748	0.12	Arid
Ait Moutede	1566	153	26.9	1.90	2016	0.08	Arid
Ifre	1500	162	16.9	1.11	1674	0.10	Arid
Assaka	1422	120	23.0	1.51	1551	0.08	Arid
Bou Skour	1420	125	35.1	2.01	2325	0.05	Hyper-arid
Trab Labied	1380	139	34.2	1.84	2321	0.06	Arid
Argjoun	1020	78	18.9	1.68	2702	0.03	Hyper-arid
El Miyit	792	49	14.6	1.48	2704	0.02	Hyper-arid
Jbel Hssain	725	33	14.8	1.79	2730	0.01	Hyper-arid
Lac Iriki	450	55	12.8	1.92	2694	0.02	Hyper-arid

II.5.2. Evaporation (Chamayou et al. 1977)

Les mesures effectuées à l'évaporomètre Piche pendant quinze années ont permis de calculer les moyennes mensuelles et annuelles d'évaporation à Ouarzazate. Ces données ont été extrapolées à la vallée du Drâa en tenant compte du facteur température. L'évaporation réelle est plus difficile à chiffrer mais peut être approchée par la méthode de Thornthwaïte.

L'évaporation potentielle annuelle atteint des valeurs importantes : 2,8 m à Ouarzazate, 2,95 m à Tagounite, 3,00 m à Zagora. Bien que proches, ces trois stations accusent une sensible différence due aux facteurs altitude et température. Les moyennes journalières varient entre 0,4 cm en janvier et 1,3 cm en juillet. Les valeurs additionnées des mois de mai à septembre représentent plus de la moitié de l'évaporation totale annuelle.

En s'inspirant de la méthode de Thornthwaite basée sur le bilan hydrique journalier, on peut évaluer l'évaporation réelle à l'intérieur et en dehors des palmeraies :

- l'évaporation réelle en dehors de la vallée cultivée est pratiquement égale à la pluviométrie annuelle amputée des infiltrations, lesquelles ne dépassent pas 10 %
- à l'intérieur des palmeraies, l'apport d'eau pour l'irrigation détermine une humidité relative qui fait augmenter l'évaporation réelle. La surface de la nappe, souvent proche du sol, permet aux plantes et à la remontée capillaire d'ajouter une certaine quantité d'eau à l'air ambiant. Ceci explique que l'évaporation réelle dans les palmeraies soit sept fois supérieure à celle des bordures immédiates et soit comprise entre 35 et 40 cm/an.

Ces constatations permettent de différencier un microclimat des palmeraies au sein d'une région désertique et aride.

Le climat de la région est à la limite de l'aridité et de l'hyperaridité sec à déficit continu, tandis que celui des palmeraies est subhumide sec avec un surplus modéré en hiver. Ces différences permettent de comprendre le contraste entre l'aspect désertique de la région et la relative richesse des palmeraies dans une zone présaharienne.

II.6. Hydrogéologie du Bassin du Draa

La moyenne vallée du Drâa est un système hydrologique pouvant être divisé en sous-bassins avec la surimposition des fousms marquant les limites des six palmeraies composant la vallée. L'écoulement de surface est continu et on peut en dire autant pour l'écoulement souterrain. En effet, les fousms étant caractérisés par des schistes imperméables ou semi-perméables, empêchent la communication des eaux souterraines. Ce qui fait que l'on compte autant de palmeraies que de réservoirs hydrogéologiques.

Jusqu'à présent, on ne connaît pas de nappes profondes dans la région bien que celle-ci ait été l'objet de beaucoup de travaux depuis Choubert (1939) dans le cadre de la mission hydrogéologique du sud. Nous parlerons donc que des nappes phréatiques qui se situent dans le Quaternaire détritique (Chamayou, 1966). On dénombre donc de l'amont en aval, les nappes de Mezguita, de Tinzouline, de Ternata, de Fezouata, de Ktaoua et de M'Hamid (fig.6). C'est celle de Tinzouline qui fait l'objet de notre étude.

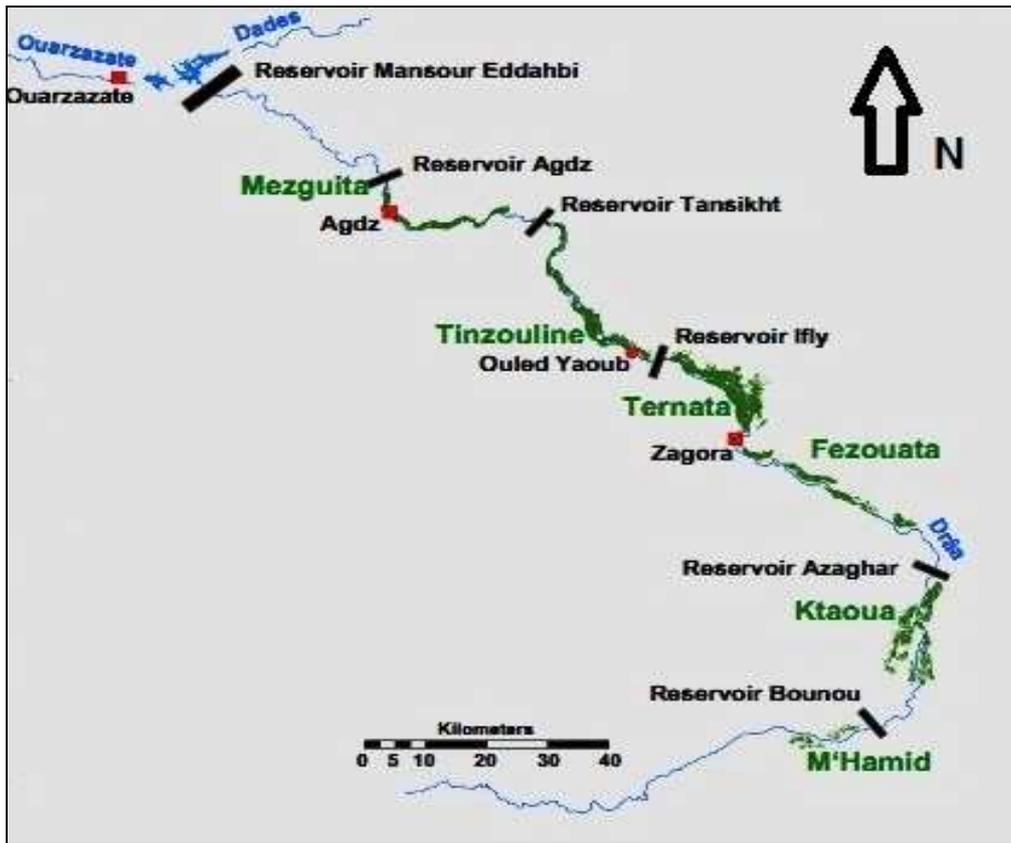


Fig. 6 : Situation géographique des palmeraies.

Cependant, on pourrait laisser penser qu'il puisse y avoir de réservoirs aquifères en dessous de nappes phréatiques quaternaires qui sont exploités continuellement de nos jours. Dans les travaux menés par le projet IMPETUS, une carte hydrogéologique (Fig. 7) est réalisée à partir de la carte géologique de la région (Feuille Ouarzazate 1/500000). Etant donné le manque de données suffisantes, les attributs hydrogéologiques (conductivité hydraulique, porosité....) sont ajustés sur la base de la carte hydrogéologique de l'Allemagne à 1/200000. En superposant cette carte avec celle lithologique (Fig. 8) de la région, on constate une perméabilité allant des hyper faibles dans les roches cristallines à fortement variées dans les roches meubles qui constituent le Quaternaire.

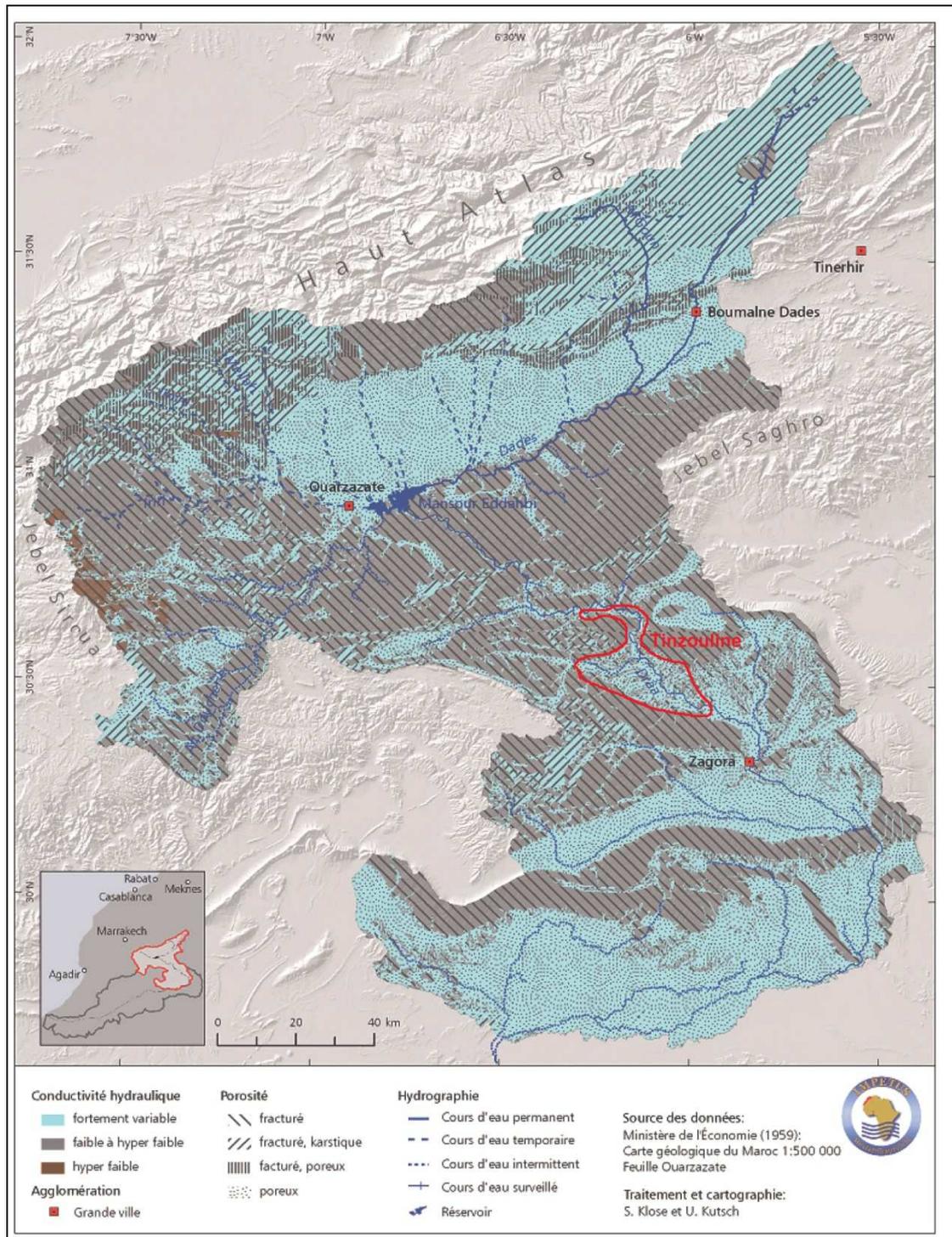


Fig. 7 : Carte hydrogéologique du bassin du Haut et Moyen Drâa (IMPETUS, 2008)

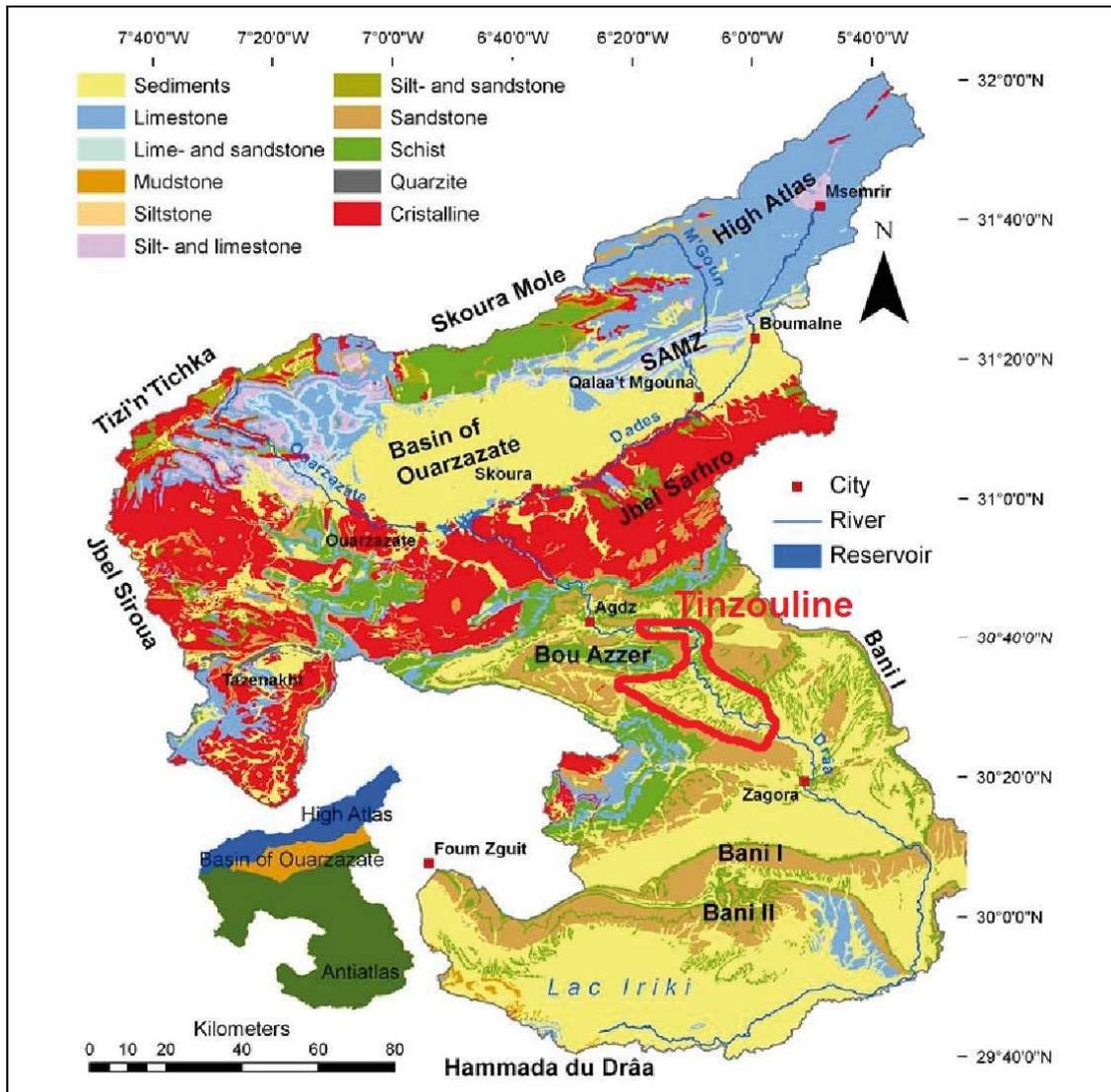


Fig. 8 : Carte lithologique du bassin du Haut et Moyen Draa (Klose. 2009)

II.6.1. Nappes phréatiques du Quaternaire

Les cuvettes de la vallée du Draa, sont constituées d'un substratum schisteux sur lequel reposent les dépôts du Quaternaire moyen et ancien (Chamayou, 1966).

II.6.1.1. La perméabilité

La perméabilité des réservoirs quaternaires est très variée dans les palmeraies du fait de l'hétérogénéité des alluvions et la répartition inégale des divers niveaux du Quaternaire. Des essais de débits ont été réalisés et ont montré de valeurs différentes d'une palmeraie à l'autre. Les valeurs moyennes décroissent de l'amont vers l'aval (Tab. 2). Cette décroissance est liée aux dépôts, qui d'abord grossiers et sableux dans les premières cuvettes, deviennent ensuite plus fins et limono-sableux dans les dernières palmeraies (Chamayou, 1966).

II.6.1.2. Puissances aquifères :

Les aquifères sont de plus en plus épais d'amont en aval. Les puissances sont en moyenne inférieures à 15 mètres à Mezguita et Tinzouline, de l'ordre de 15 mètres au Ternata et puis atteignent 25 au Fezouata, 35 au Ktaoua et enfin 40 mètres au M'Hamid (Chamayou, 1966). L'accroissement d'épaisseur aquifère d'amont en aval compense ainsi les diminutions de perméabilité aussi d'amont vers l'aval.

Chamayou (1966) explique cela sur le plan géologique. « En effet, on constate une différence altimétrique des terrasses et reg, plus forte en amont de la vallée. Celle-ci étant étroite, les dépôts anciens ont été décapés presque entièrement avant une nouvelle phase d'alluvionnement. Au contraire en aval de Zagora, la superposition des terrasses moyennes et terrasses récentes, accuse un alluvionnement, prépondérant sur les phases de creusement. Les débits du Drâa, plus forts en amont, ont permis le dépôt des alluvions grossières dans les premières palmeraies et des dépôts plus fins en aval, d'où la diminution notable des perméabilités de l'amont vers l'aval.

Tab.2: Perméabilités du Quaternaire (Chamayou. 1966)

Palmeraies	Perméabilité minimum en m/s	Perméabilité maximum en m/s	Perméabilité médiane en m/s	Nombre d'essais retenus
MEZGUITA	8,2 10 ⁻⁴	1,2 10 ⁻³	1,0 10 ⁻³	2
TINZOULINE	4,3 10 ⁻⁴	3,5 10 ⁻²	6,8 10 ⁻³	10
TERNATA	4,6 10 ⁻⁴	7,0 10 ⁻³	3,0 10 ⁻³	15
FEZOUATA	1,9 10 ⁻⁵	7,3 10 ⁻³	1,5 10 ⁻³	17
KTAOUA	3,5 10 ⁻⁵	4,8 10 ⁻⁴	2,5 10 ⁻⁴	18
M'HAMID	9,0 10 ⁻⁵	5,0 10 ⁻⁴	2,7 10 ⁻⁴	8
Rapport des valeurs extrêmes	43	14	12	

II.6.2. Nappes du socle

Le Quaternaire de Tinzouline repose sur un socle essentiellement schisto-gréseux, fissuré et faillé.

Les formations du socle qui affleurent, vont du Précambrien terminal composé de conglomérats de base et des grès, s'ensuivent les formations cambro-ordoviciennes, essentiellement schisteuses, fissurées et fracturées. La carte hydrogéologique (Fig. 7) montre qu'avec la perméabilité de fissure que pourrait avoir le substratum schisteux, les nappes

quaternaires et les grés et conglomérats du Précambrien peuvent fonctionner ensemble comme un réservoir multicouche. Mais ne peut être affirmé que par des études approfondies sur les aquifères profonds, choses qui manquent de nos jours.

III. APPORTS DE L'HYDROCHIMIE

La composition chimique des eaux souterraines est acquise lors de la traversée du sol et de son séjour dans le réservoir. L'eau, au contact de l'encaissant, acquiert une charge minérale caractéristique des roches traversées. Les éléments qui s'y trouvent en solution portent des informations sur la nature de l'aquifère traversé.

III.1. Méthodologie :

Afin de comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin de Draa une étude hydro-chimique a été menée à la fois sur le terrain et au laboratoire.

III.1.1. Travail *In situ*.

Faute de mesures et d'échantillonnages systématiques, une mission de terrain dans la vallée de Draa a été effectuée durant la période du 20 au 21 mars 2011. Lors de cette mission des paramètres physico-chimiques ont été mesurés ou relevés sur place, à savoir ; les coordonnées GPS, la profondeur de l'eau dans les puits, la profondeur totale du puits, la conductivité électrique, la température de l'eau et enfin le pH. Les coordonnées GPS ont été notés au niveau de chaque site.

Une base de données préliminaire est établie sur la base de ces mesures. En plus des paramètres relevés ou mesurés sur le terrain, cette base comporte aussi toutes les données préliminaires ainsi que les observations faites sur le terrain telles que :

- L'équipement (pompe...) et l'aménagement du puits (margelle et autres),
- La position par rapport à la vallée (rive gauche ou droite, hors ou intérieur vallée),
- La nature du sol (la lithologie)

Les points d'eaux étudiés ont fait également l'objet de prélèvement d'échantillons d'eau. Au total trente quatre échantillons (34) ont été collectés : six échantillons (6) d'eau de surface provenant de l'oued Draa et vingt-huit échantillons (28) d'eaux souterraines, récoltés au niveau des puits environnants (Fig. 9),

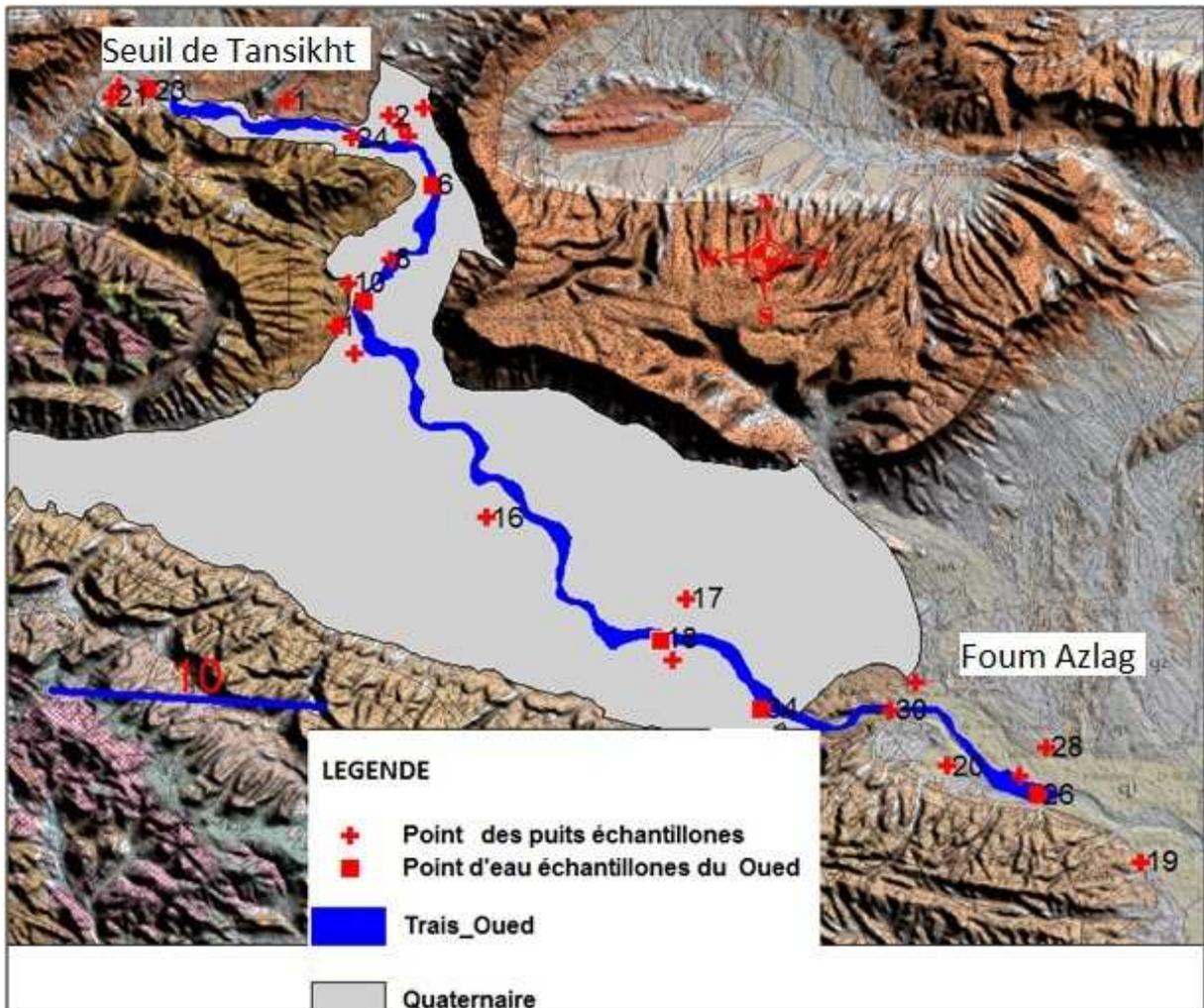


Fig. 9 : localisation des points des prélèvements des eaux dans la nappe de Tinzouline (région du Draa Moyen)

Lors de la campagne d'échantillonnage, toutes les précautions ont été prises pour que les résultats soient significatifs :

- Les flacons ont été rincés avant tout prélèvement
- Les eaux prélevées ont été isolées de l'atmosphère ambiante puis gardées à 4 °C pour minimiser les variations des paramètres non conservés

III.1.2. Travail réalisé au laboratoire

Les échantillons prélevés ont fait l'objet d'analyses chimiques. Ces analyses ont porté uniquement sur les éléments majeurs à savoir : les bicarbonates (HCO_3^-), les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}), le magnésium (Mg^{2+}), le calcium (Ca^{2+}), le sodium (Na^+), le potassium (K^+) ainsi que les espèces azotées (NO_3^- , NH_4^+ et NO_2^-)

Les analyses ont été effectuées au Laboratoire d'Hydrogéologie de la Faculté des Sciences de l'Université Cadi Ayyad. Deux méthodes d'analyse ont été utilisées :

III.1.2.1. Dosage de l'alcalinité par volumétrie

La volumétrie ou dosage volumétrique, consiste à calculer la concentration d'un composé à l'aide d'un autre de concentration connue. Dans notre cas, c'est la concentration en bicarbonates que nous devons calculer. Nous avons donc titré nos échantillons avec de l'acide sulfurique (H_2SO_4) de normalité égale à 0.1N. Le principe est donc, d'atteindre, à l'aide, d'un indicateur coloré, l'équilibre de l'échantillon avec la solution de titrage.

Le procédé technique est de verser dans un erlenmeyer 100ml de notre échantillon. On y ajoute 2 ou 3 gouttes de phénophtaléines ; deux cas peuvent se présenter :

- Apparition d'une coloration rose, le PH est supérieur à 8,3 et les CO_3^{2-} existent et on les titre avec l' H_2SO_4 (0.1N)
- Aucune coloration n'apparaît, on ajoute 3 gouttes d'indicateur mixte et on titre avec l' H_2SO_4 (0.1N) ; dans ce cas on dose l'ion HCO_3^- ;

Concernant les calculs des concentrations en CO_3^{2-} et HCO_3^- les équations d'équilibre s'écrivent sous les formes suivantes :

- $CO_3^{2-}(\text{meq.l}^{-1}) = 0.1 * V * \frac{1000}{100}$
- $HCO_3^-(\text{meq.l}^{-1}) = 0.1 * V * \frac{1000}{100}$

Où V est le volume en ml de H_2SO_4 utilisé pour le dosage. La conversion des concentrations en mg/l s'obtient en multipliant ces dernières par le nombre d'équivalent gramme (60 pour le CO_3^{2-} et 61 pour le HCO_3^-).

III.1.2.2. Dosage des autres ions dissous par chromatographie en phase ionique

La chromatographie est une technique de séparation d'éléments constituant un mélange liquide ou gazeux. Elle se base sur une technique où l'on prend en compte l'équilibre des composés présents dans un échantillon, entre une phase stationnaire installée dans une colonne et une autre qui est mobile. Cette dernière, en se déplaçant, entraîne les éléments dans la phase stationnaire, où ils y sont entraînés à des vitesses différentes dues à leurs propriétés intrinsèques ou à leur affinité avec la phase stationnaire. A la sortie de cette dernière, un

détecteur émet un signal (un pic) proportionnel, pour chaque élément du mélange parcourant la colonne, à sa concentration.

Dans notre cas les éléments sont principalement des anions et des cations, auxquels, pour chaque catégorie, on devait avoir une phase mobile (appelée aussi éluant) et stationnaire spécifique.

L'appareillage :

Les analyses ont été effectuées à l'aide de l'appareil de chromatographie ionique de marque ICS 1100 de Dionex (Fig. 10) du Laboratoire d'Hydrogéologie de la Faculté des Sciences de l'Université Cadi Ayyad :

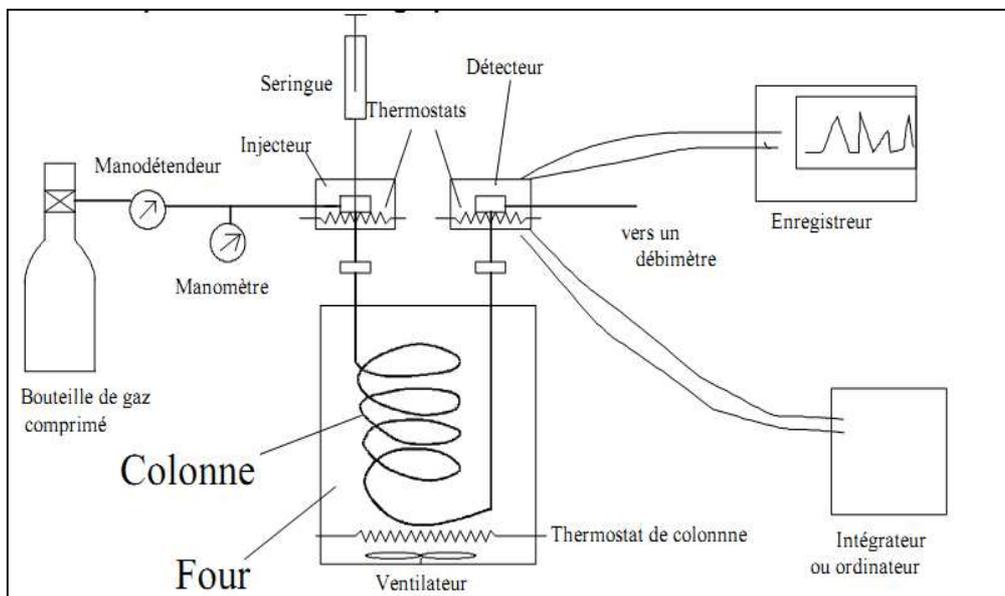


Fig. 10 : Principe de La Chromatographie ionique

III.2. les Résultats

Les résultats (exprimés en mg/l) des analyses physico-chimiques sont reportés dans le tab. 3 :

N° échantillons	T(°C)	Ph	CE (µs/cm)	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	BI(%)
Les eaux de surface												
6	18	6,97	1200	113,40	137,39	2,84	268,07	97,13	42,90	92,27	5,08	5%
10	19	7,52	1200	100,80	137,32	2,95	273,58	97,25	43,97	92,24	5,08	6%
18	20	7,42	1200	110,25	145,90	2,89	287,14	100,78	46,31	97,08	5,01	5%
23	16	7,36	1300	113,40	131,35	3,07	262,37	95,58	42,88	89,18	5,14	5%
26	19	7,59	1200	116,55	150,70	2,75	294,01	102,71	47,01	99,96	5,01	4%
34	20	7,72	1200	116,55	152,79	2,70	294,69	101,52	46,64	99,79	6,41	4%
Les eaux souterraines												
P1	23	7,03	2100	151,20	300,98	14,82	520,76	167,83	83,73	179,93	8,18	3%
P2	21	7,29	1300	211,05	107,15	28,58	255,04	148,19	59,36	43,16	3,43	7%
P3	19	6,82	1400	233,10	299,08	30,88	547,89	211,83	88,12	155,19	6,77	1%
P4	25	6,95	2200	176,40	331,03	63,49	522,55	221,37	89,00	146,95	7,69	2%
P5	22	6,87	3000	223,65	606,55	7,47	602,06	211,90	94,53	357,37	7,27	1%
P7	26	6,93	1400	198,45	90,38	7,11	441,82	150,07	61,01	76,04	9,82	3%
P8	22	6,9	2700	233,10	410,17	2,80	767,61	220,47	105,46	264,37	6,86	0%
P9	20	7,21	5200	384,30	1125,28	17,73	994,69	605,68	228,82	406,44	33,50	7%
P11	25	6,89	1800	157,50	279,74	176,75	156,84	245,11	25,40	76,20	7,91	4%
P12	21	6,86	3000	252,00	488,15	8,80	832,70	252,84	114,67	293,73	7,87	-1%
P13	22	7,28	1000	223,65	85,40	71,44	68,27	121,90	36,54	45,73	3,70	13%
P14	21	6,72	3800	277,20	649,42	34,78	878,00	374,00	174,13	363,02	9,21	8%
P15	22	7,4	1300	390,60	132,24	1,87	6,36	115,07	52,81	82,69	13,55	15%
P16	23	7,04	2500	182,70	430,36	201,59	349,48	283,21	90,13	116,47	5,51	2%
P17	25	6,96	540	110,25	42,37	19,06	64,11	65,80	19,34	18,13	2,25	10%
P19	18	7,36	2500	296,10	355,83	44,93	442,65	190,60	84,89	232,75	30,39	4%
P20	19	6,84	4800	198,45	934,51	69,29	1138,61	430,86	230,45	490,77	29,75	7%
P21	21	6,91	3200	236,25	453,37	27,05	722,26	267,56	137,30	316,42	8,12	9%
P22	22	7,01	3400	248,85	537,27	28,32	808,41	311,01	154,27	339,59	8,90	8%
P24	18	6,35	2700	620,55	47,20	1,77	1046,68	356,54	119,30	113,17	8,60	-1%
P25	24	6,78	630	185,85	29,35	20,67	54,75	81,84	22,18	28,64	1,26	14%
P27	21	6,9	4000	255,15	876,86	26,29	1075,41	324,24	212,02	596,85	11,30	7%
P28	23	7,3	3100	157,50	570,46	113,26	606,98	425,00	121,87	167,51	8,59	8%
P29	25	7	750	201,60	36,51	25,84	70,90	81,56	25,46	47,36	3,42	14%
P30	21	6,88	4100	258,30	725,78	19,46	1002,92	333,62	194,37	477,53	12,21	8%
P31	17	6,75	2700	211,05	503,27	1,94	609,72	312,56	90,83	169,43	3,63	0%
P32	26	6,94	2700	207,90	436,33	26,32	706,02	258,88	95,21	222,92	6,30	0%
P33	23	6,95	3800	211,05	629,69	24,87	931,28	313,82	168,71	411,92	10,36	8%

Tab.3 : Paramètres physico-chimiques des eaux de surface et souterraines dans la nappe de Tinzouline (Campagne du 20 au 21 mars 2011)

III.2.1. Qualités des analyses chimiques

La fiabilité des résultats des analyses effectuées est vérifiée à l'aide de la balance ionique de la solution (BI) se basant sur l'électro neutralité des eaux naturelles. En théorie, la somme des cations est égale à celle des anions. Seuls les ions majeurs (calcium, magnésium, sodium et potassium pour les cations ; chlorures, sulfates, nitrates et bicarbonate pour les

anions) sont pris en compte. Cependant, les erreurs systématiques de mesure qui sont dues à la technique analytique et à la manipulation, et ainsi que celles liées aux éléments non dosés (les éléments en trace) provoquent une imprécision dans la détermination de la fiabilité d'une analyse. La balance ionique est ainsi exprimée (Schoeller, 1962) :

$$\text{Balance ionique } \mathbf{BI} = \frac{\Sigma(\mathbf{cations}) - \Sigma(\mathbf{anions})}{\Sigma(\mathbf{cations}) + \Sigma(\mathbf{anions})} \times \mathbf{100}$$

Selon la valeur de Balance ionique (BI), les analyses chimiques peuvent être classées en trois catégories :

- $BI < 5\%$: Analyses de bonne qualité,
- $5 \leq BI < 10$: Analyses admissibles,
- $BI \geq 10\%$: Analyses douteuses à prendre avec beaucoup de précaution.

Dans l'ensemble, des 34 échantillons analyses effectuées, 18 sont bonnes, donc un pourcentage de 52%. Alors, que les analyses admissibles ne représentent que 11 échantillons, l'équivalent de 32% de l'ensemble des eaux des surface et souterraine). 5 échantillons présentent des analyses considérées comme douteuses, ($BI \geq 10$), équivalent de 14% ils sont alors supprimées. Au total, nous avons travaillé avec 29 échantillons, dont 6 viennent des eaux de surface.

Pour évaluer la qualité des données de conductivité mesurées sur le terrain, on se base sur les éléments totaux dissouts (TDS) en fonction de conductivité.

D'après la figure 11 on remarque une bonne corrélation entre la conductivité des eaux souterraines et le TDS. Par contre, pour les eaux de surface, on remarque une mauvaise corrélation en raison du parcours relativement complexe des eaux de surface et du temps d'homogénéisation de ces eaux. On pourrait qualifier ces eaux de non mûres de point de vue hydro chimique.

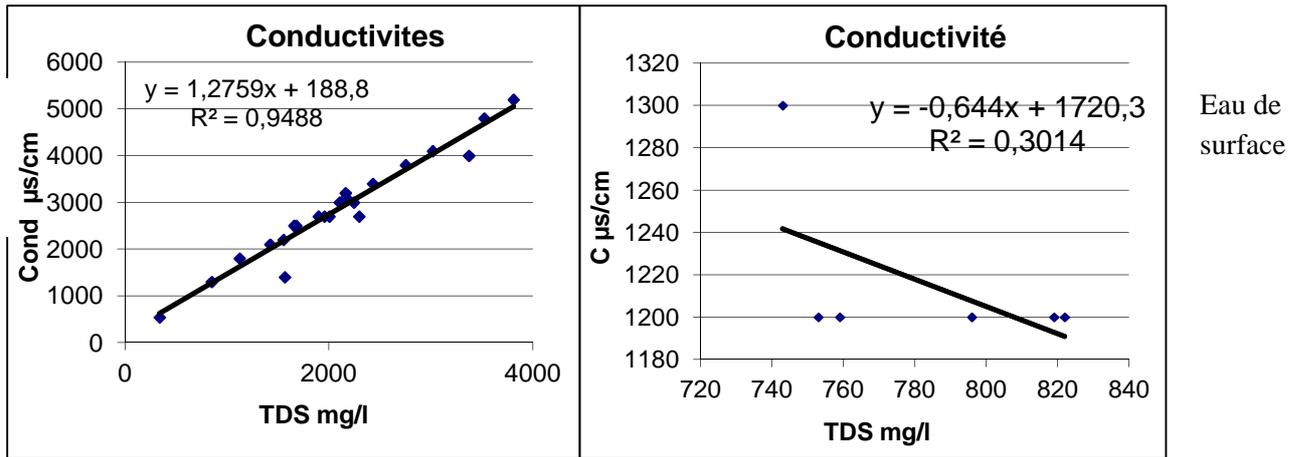


Fig. 11 : Conductivité des eaux de surface et des eaux souterraines de la vallée de Draa en fonction du TDS

III.2.2. Minéralisation des eaux de surface

L'objectif de l'étude des eaux provenant de l'oued Draa, est de comparer l'état chimique des eaux de la nappe à celles provenant de l'oued Draa et de suivre l'évolution des éléments chimiques des eaux de surface de l'amont vers l'aval.

III.2.2.1. Evolution spatiale des éléments physico-chimiques

La Figure 12 montre l'évolution amont-aval des différents éléments physico-chimiques des eaux du Draa moyen.

Vue la qualité des mesures de la conductivité sur le terrain, l'évolution chimique de la minéralisation des eaux de surface a été prise en compte.

D'après les ions totaux dissous et les éléments chimiques, on voit une augmentation depuis l'amont vers l'aval. Les variations des éléments physico-chimiques le long d'oued peuvent être expliquées par le phénomène de conservation, par le phénomène d'évapotranspiration et le lessivage des sols. Par contre pour le bicarbonate, la courbe est oscillatoire. Cela peut être expliqué par le phénomène de volatilisation en réagissant avec l'atmosphère.

Comme la distance entre stations est courte, la variation des concentrations n'est pas trop significative. Les teneurs en sulfates des eaux de l'Oued Draa sont relativement élevées et peuvent dépasser 250mg/l.

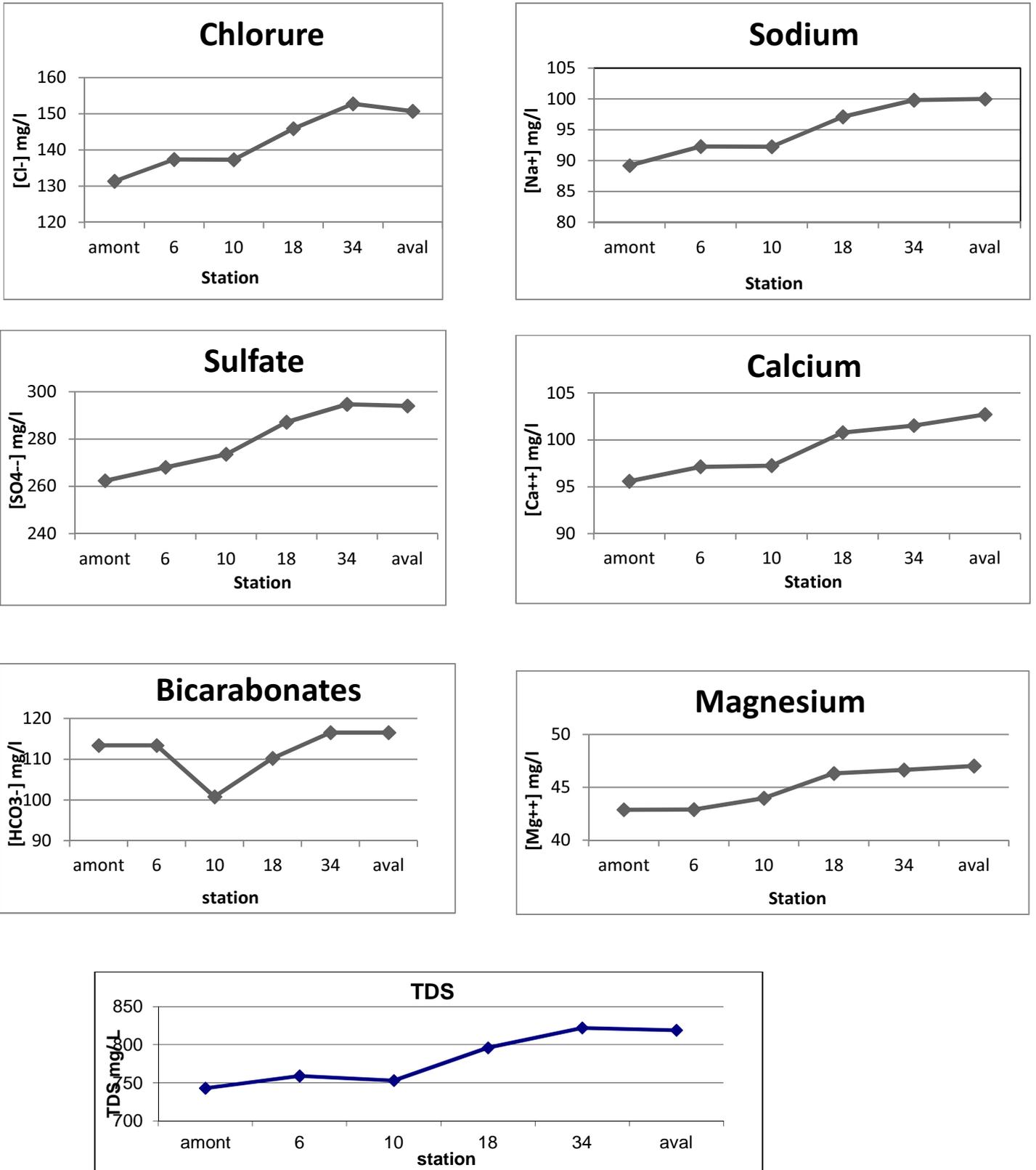


Fig. 12 : Evolution amont- aval des concentrations de quelques éléments chimiques des eaux de surface (Mission du 20 au 21 Mars 2011)

III.2.2.2. Faciès chimique et origine de la minéralisation

Le faciès chimique des eaux est intimement lié à la nature des terrains traversés lors du transit des eaux ainsi qu'à la nature des sols lessivés. L'objectif principal d'une représentation (diagramme), est de permettre une approche rapide des résultats analytiques en vue de caractériser facilement une eau, suivre son évolution ainsi que de la comparer à d'autres eaux.

III.2.2.2.1. Projection des analyses des eaux de surface sur le diagramme de Piper

Afin de déterminer le faciès chimique des eaux de surface du Draa Moyen on a utilisé le diagramme de Piper. Le report des différentes analyses réalisées sur les eaux de l'oued Draa sur le diagramme révèle que :

- dans le diagramme des cations, les points d'eau se situent dans la zone centrale où aucun cation ne l'emporte. L'eau est en général mixte.
- dans le diagramme des anions les points d'eau se situent en zone mixte avec une prédominance des sulfates sur des chlorures et des bicarbonates.

Le faciès chimique des eaux d'oued Draa sont de type sulfaté-calcique (Fig.13). L'histoire de l'eau collectée dans le réseau hydrographique, stockée dans le barrage Mansour Ed Dahbi, puis lâchée dans le cours du Drâa, est relativement complexe en raison de son parcours véritablement diversifié puisqu'elle prend naissance dans le Haut Atlas, parcourt des terrains très diversifiés au sein du Haut Draa en amont de Zaouiat N'Oubraz, pour venir enfin s'accumuler au niveau de la retenue du barrage.

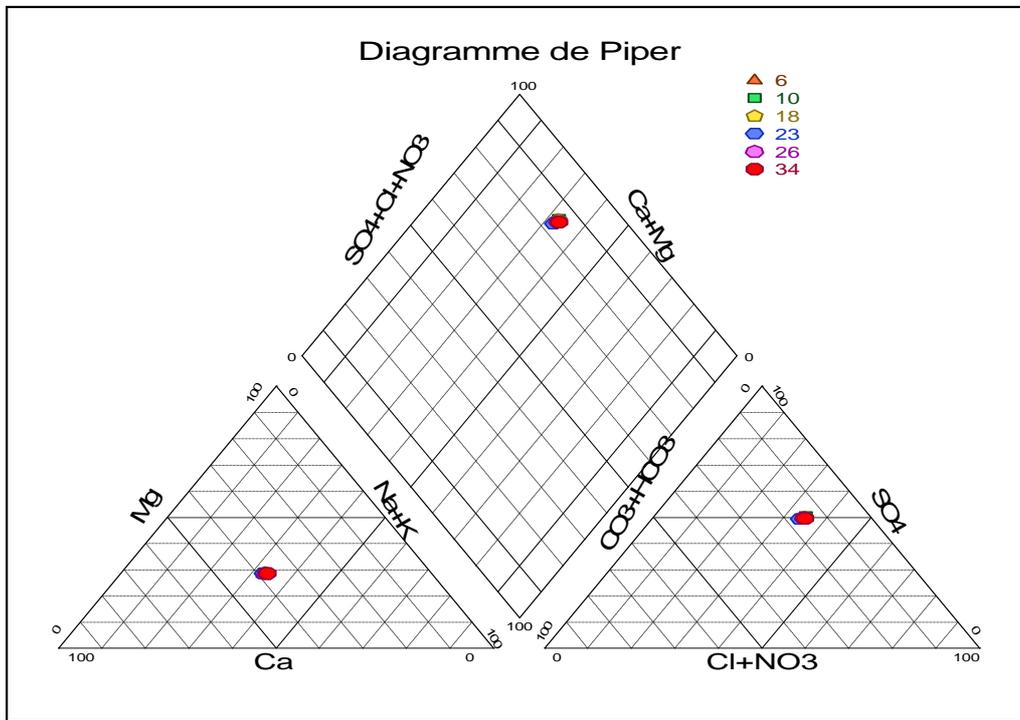


Fig. 13 : Projection des analyses chimiques des eaux de surfaces de l'Oued Draa sur le diagramme de Piper.

III.2.2.2.2. Projection Des Analyses Des Eaux De Surface Sur Le Diagramme Berkalof F-Scholler :

Afin de déterminer les origines de la minéralisation, nous avons reporté les analyses chimiques dans le diagramme Berkaloff-Scholler. cette projection montre :

- Une dominance des ions sulfates et calcium (SO_4^{-2} , Ca^{2+}) pour les points d'eau d'oued Draa.
- Que les tracés des échantillons analysés sont presque parallèles ; ce qui montre que les eaux appartiennent à la même famille d'eau. Cela nous permet de dire que ces eaux ont subit la même évolution et les mêmes processus d'acquisition de la minéralisation. Chose déjà avancée par le diagramme de Piper.

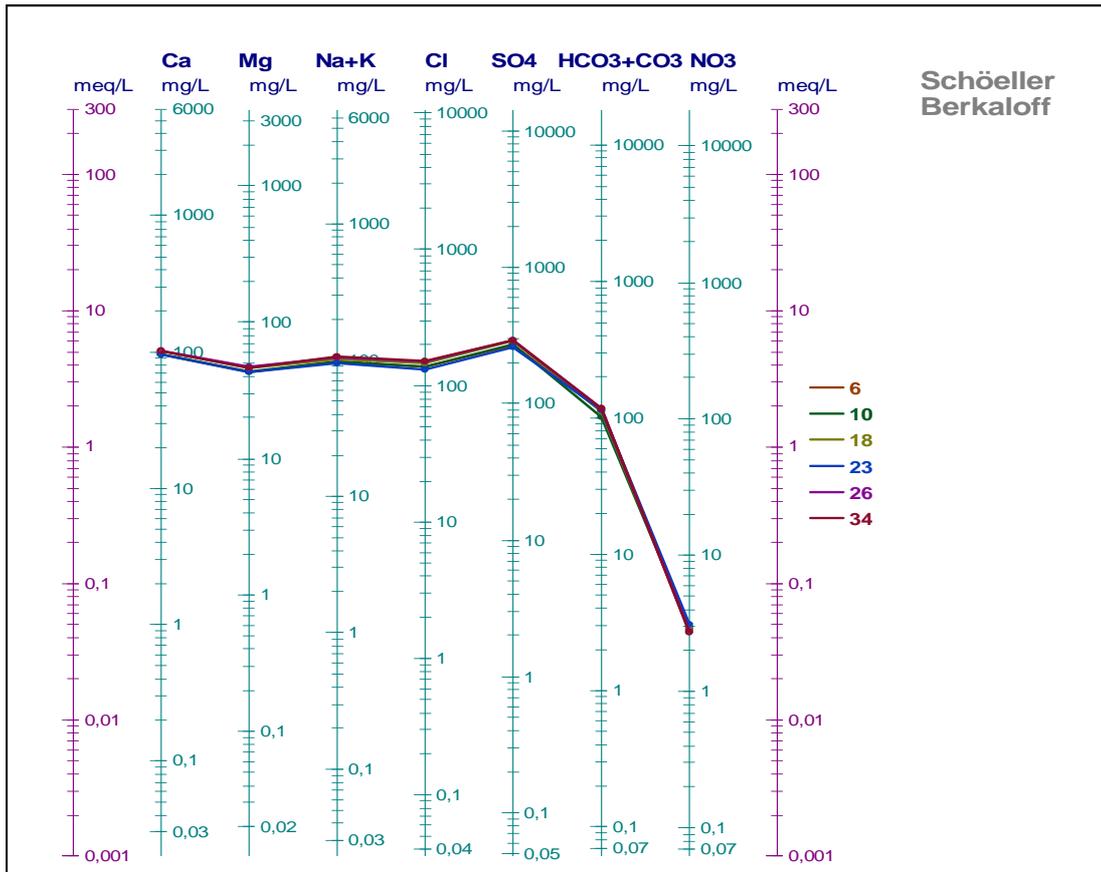


Fig. 14 : Projection des analyses des eaux de l'Oued Draa sur le Diagramme de Berkaloff-Scholler

Cette abondance en sulfates dans les eaux des oueds peut être expliquée par le lessivage du flanc Sud du Haut Atlas central et du versant du Jbel Saghro. Cette région est connue par ses nombreuses minéralisations sulfatées telles que la barytine ($BaSO_4$), les sulfures de fer (pyrrhotite) (Ouyse, 2005). Ces eaux enrichies en acide vont être neutralisées au contact des formations de carbonates qui sont omniprésents dans les faciès anti-atlasique (Ouyse, 2005).

Les concentrations des chlorures peuvent être attribuées à l'évaporation au niveau des eaux de surface. (Ouyse, 2005).

Les affluents de l'oued Draa contribuent plus ou moins fortement à sa salinité en fonction de l'importance des terrains salifères qu'ils traversent dans leur bassin versant. Parmi ces affluents, oued Ouarzazate est le plus salé parce qu'il traverse les formations salifères (Tertiaire) pour plus de la moitié de son parcours (Chamayou, 1966).

III.2.3. Minéralisation des eaux souterraines

Comme dans le cas des eaux de surface, la salinité des eaux souterraines dépend de la nature des roches traversées. La variation des concentrations des éléments dissouts, est en fonction du temps et de l'espace. Par conséquent les concentrations des éléments dissouts, varient d'une oasis à l'autre et au sein d'une même oasis.

- Les eaux bicarbonatées calciques douces à résidu inférieur à 1 g/l, sont limitées aux trois premières palmeraies et se trouvent dans une proportion de 10 %, leur origine est à rechercher dans l'infiltration, dans le sous-écoulement et dans les eaux de pluies (Chamayou, 1966).
- Les eaux chlorurées présentant une proportion de 35% dans la répartition des eaux souterraines, sont variées on distingue :
 - Les eaux chlorurées calciques, caractérisées par une faible concentration de l'ordre de 1 g/l,
 - Les eaux chlorurées sodiques, caractérisées par une forte concentration en NaCl,
 - Les eaux hyper chlorurées, rares sauf dans les zones d'émergences des nappes où la teneur en NaCl peut atteindre 15 à 20 g/l. L'origine de cette concentration est à rechercher dans l'évaporation au niveau du plan d'eau ou dans la frange capillaire du sol (Chamayou, 1966).
- Les eaux sulfatées sont prépondérantes dans la vallée du Drâa moyen (50%), on peut distinguer les sulfatées alcalines (résidus secs évalués à 10 g/l) et les sulfatées calciques (résidus secs de l'ordre de 1 à 3 g/l) (Chamayou, 1966).

III.2.3.1. Piézométrie de la nappe de Tinzouline

Dans le cadre de ce travail, une campagne d'échantillonnage a porté sur un ensemble de points d'eau à la fois dans et en dehors des limites conventionnelles de l'oasis de Tinzouline. Sur les 22 points d'échantillonnage, la cote piézométrique décroît de l'amont vers l'aval (le long de l'oued Drâa). Elle est de l'ordre de 880 mètres au seuil de Tansikht en amont, et de 780 mètres au foug Azlag. Ce qui donne une dénivelée totale de 100 mètres d'eau.

Les courbes isopièzes (Fig. 16) définissent un sens d'écoulement souterrain général qui est NW-SE en suivant le profil longitudinal du Draa. Les lignes de courants souterrains (prises perpendiculairement aux isopièzes), divergentes de part et d'autre du canal central de drainage

de l'oued, définissent une relation nappe-oued, qui se traduit par une alimentions de l'aquifère par l'oued Drâa (cette partie sur l'hydrodynamique souterraine est détaillée dans le travail de Cheihani, 2011).

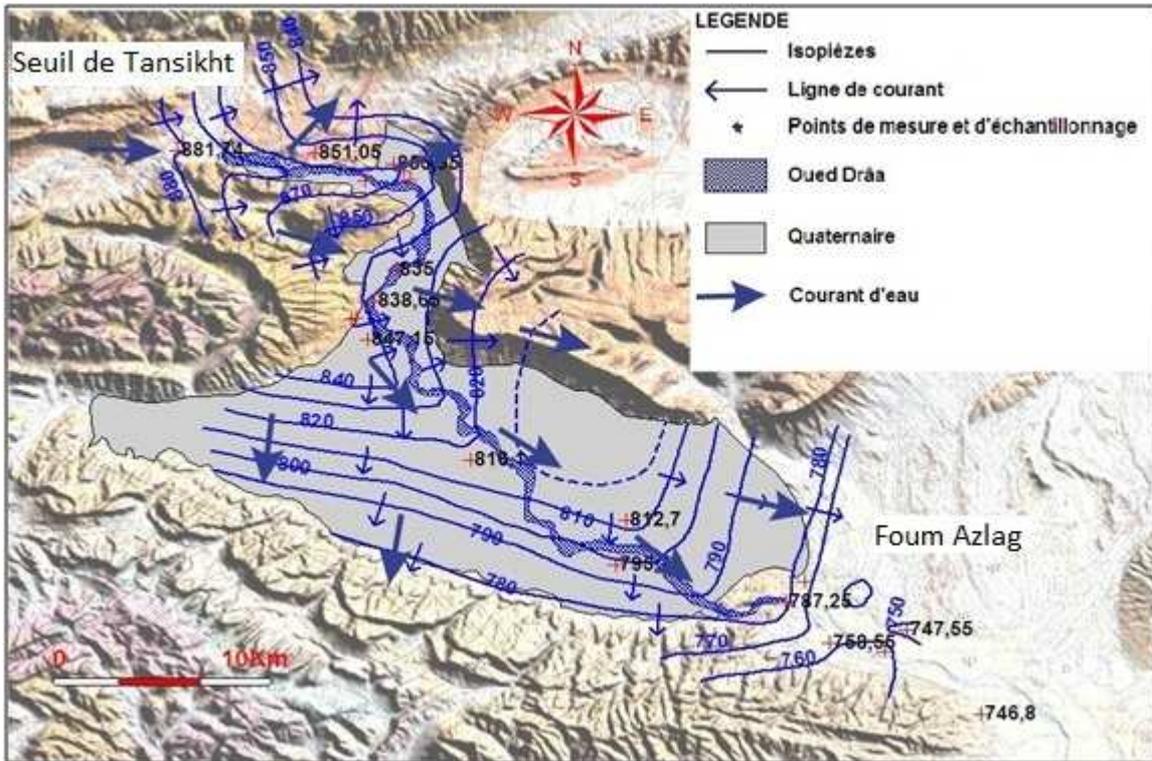


Fig. 15 : Carte piézométrique de la nappe de Tinzouline ; campagne piézométrique du 20 au 21 mars 2011

III.2.3.2. Variation spatiale de la conductivité électrique de la nappe de Tinzouline

La conductivité électrique de l'eau est liée aux ions dissous dans l'eau. Elle varie donc avec la concentration des substances chimiques se trouvant dans l'eau. Les eaux tant souterraines que de surface, se différencient par leurs propriétés physico-chimiques. Ce sont ces dernières qui permettent de classer les eaux selon les besoins à savoir les eaux potables, d'irrigation et ainsi de suite. La conductivité, mesurée sur le terrain, peut donc donner un premier aperçu sur la salinité de l'eau et d'en apprécier sa qualité.

Dans le cas de la nappe de Tinzouline, les teneurs de la conductivité varient selon les endroits (Fig.16) :

- A l'approche des fousms, la conductivité est élevée elle varie entre 3000 et 4000 μ S/cm,

- Dans la partie centrale de l'aquifère, elle est moins élevée, avec des valeurs oscillant entre 500 et 2500 μ S/cm.

Au niveau des zones latérales, elle est plus élevée, pouvant atteindre des valeurs de l'ordre de 5000 μ S/cm.

La conductivité semble obéir spatialement à la proximité du lit de l'oued. En effet, les valeurs augmentent en s'éloignant des berges du Draa, car l'alimentation de la nappe par l'oued provoque la dilution des eaux souterraines. Celles-ci, en s'éloignant de la partie centrale (lit de l'oued) semblent s'enrichir en solutés (par les phénomènes classiques tels que dissolution, temps de séjour plus ou moins important, etc.) et de facto, la conductivité électrique augmente.

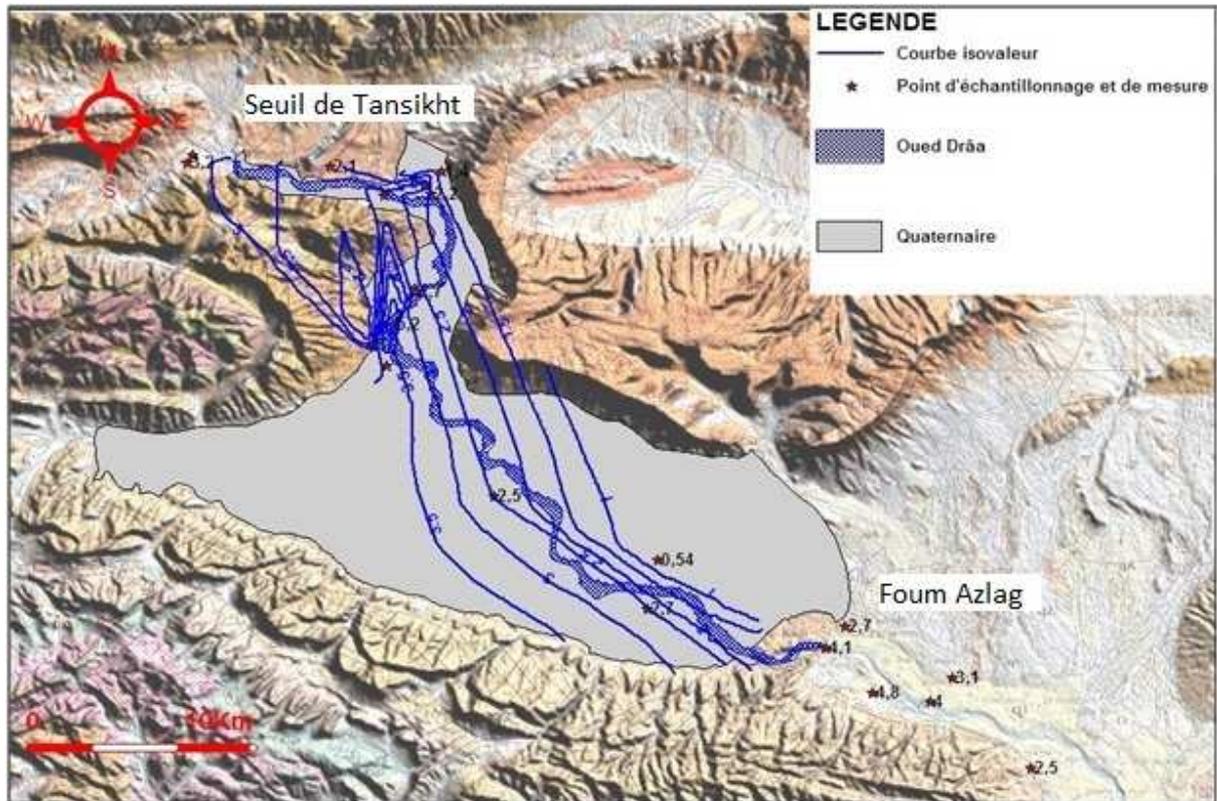


Fig. 16 : Carte de conductivité électrique de la nappe de Tinzouline, état de Mars 2011.

III.2.3.3. Evolution spatiale des concentrations dans la nappe de Tinzouline

La variation des éléments chimiques dans l'aquifère est présentée sous forme de cartes iso teneurs.

D'après les figures ci-dessous, de manière presque similaire à la conductivité électrique,

Les valeurs extrêmes relevées au niveau des fousms, sont dues à la géomorphologie du milieu et à la piézométrie de l'aquifère. Le resserrement aux fousm et l'écoulement des eaux vers la zone centrale diminue la capacité du réservoir ; on se retrouve dans la périphérie de la zone d'étude avec un volume très réduit des eaux de la nappe phréatique ce qui explique les concentrations très élevées des substances chimiques dissoutes. Ces teneurs élevées en Chlorures et en sulfates ont des effets négatifs sur la biodiversité dans la région. Sur le terrain, on remarque une régression de la végétation à l'entrée des fousms ; elle est due à la salinité élevée des eaux souterraines utilisées en irrigation (Ouyse, 2006).

Pour ce qui est de l'effet opposé entre la partie centrale et latérale de l'aquifère, on l'explique par le remplissage alluvionnaire, épousant la forme de la cuvette. La puissance du réservoir augmente en partant des zones latérales vers les zones centrales. Comme dans le cas à l'entrée et la sortie de la nappe, le volume se voit beaucoup plus important au centre qu'aux zones externes de la vallée. L'effet de dilution diminue donc du centre vers les limites latérales. C'est d'ailleurs pour cela que les palmeraies ne sont importantes qu'à l'intérieur de la vallée.

III.2.3.3.1. Répartition des chlorures dans les eaux souterraines de Tinzouline

La carte de la répartition des teneurs en Cl^- a permis de caractériser des zones des fortes concentrations qui peuvent atteindre 1125 mg/l au niveau des limites de l'aquifère et des zones de faibles concentrations qui atteignent 107 mg/l au centre de l'aquifère. L'origine des chlorures est relativement complexe. Ils peuvent provenir, depuis les parties les plus reculées du bassin versant (Haut Atlas, Haut M'goun), des terrains géologiques traversés ou à partir du lessivage des alluvions qui sont le siège de la nappe alluviale de l'oasis de Tinzouline et enfin par un recyclage à partir des eaux d'irrigation des parcelles sous palmeraie (Ouysee, 2005).

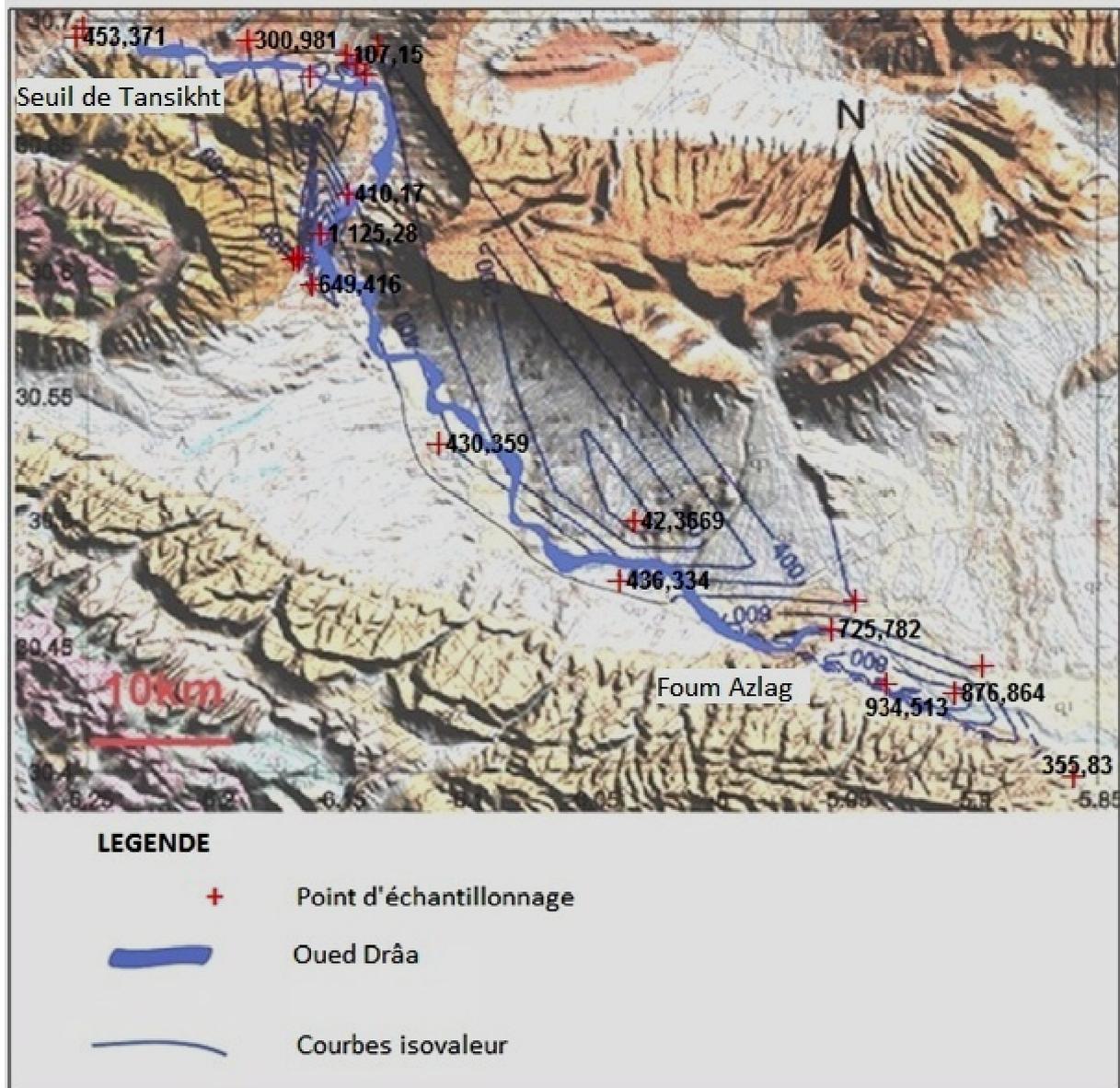


Fig. 17 : Carte en isovaleurs des chlorures ; les valeurs à côté des points, représentent les concentrations en mg/l pour chaque échantillon

III.2.3.3.2. Répartition des sulfates dans les eaux souterraines de l'Oued Draa

La figure 18 montre que les eaux ont des concentrations en sulfates qui varient entre 1138,60 et 156,83mg/l. Les fortes teneurs sont rencontrées aux limites de l'aquifère ; à savoir à l'approche du socle cristallophyllien aux abords des oasis. Ce socle est relativement riche en matériaux susceptibles de libérer des sulfates, en l'occurrence des minéralisations, des schistes, etc.

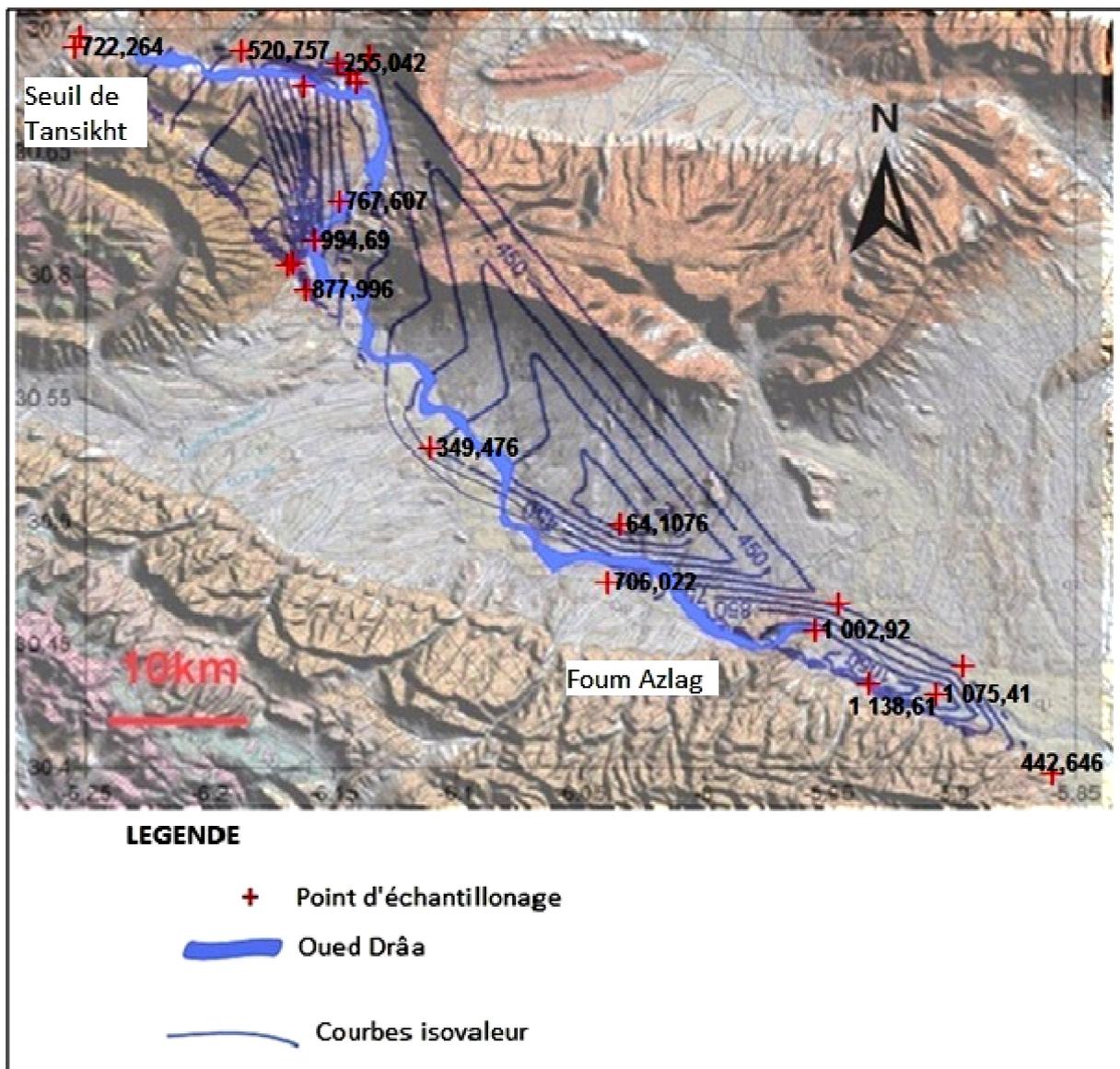


Fig. 18 : Carte en isovaleurs des Sulfates ; les valeurs à côté des points, représentent les concentrations en mg/l pour chaque échantillon

III.2.3.3.3. Répartition du magnésium dans les eaux souterraines de l'Oued Draa

La figure 19 montre que les concentrations plus élevées se trouvent au niveau des limites de l'aquifère. Par contre, au centre les teneurs en magnésium sont faibles.

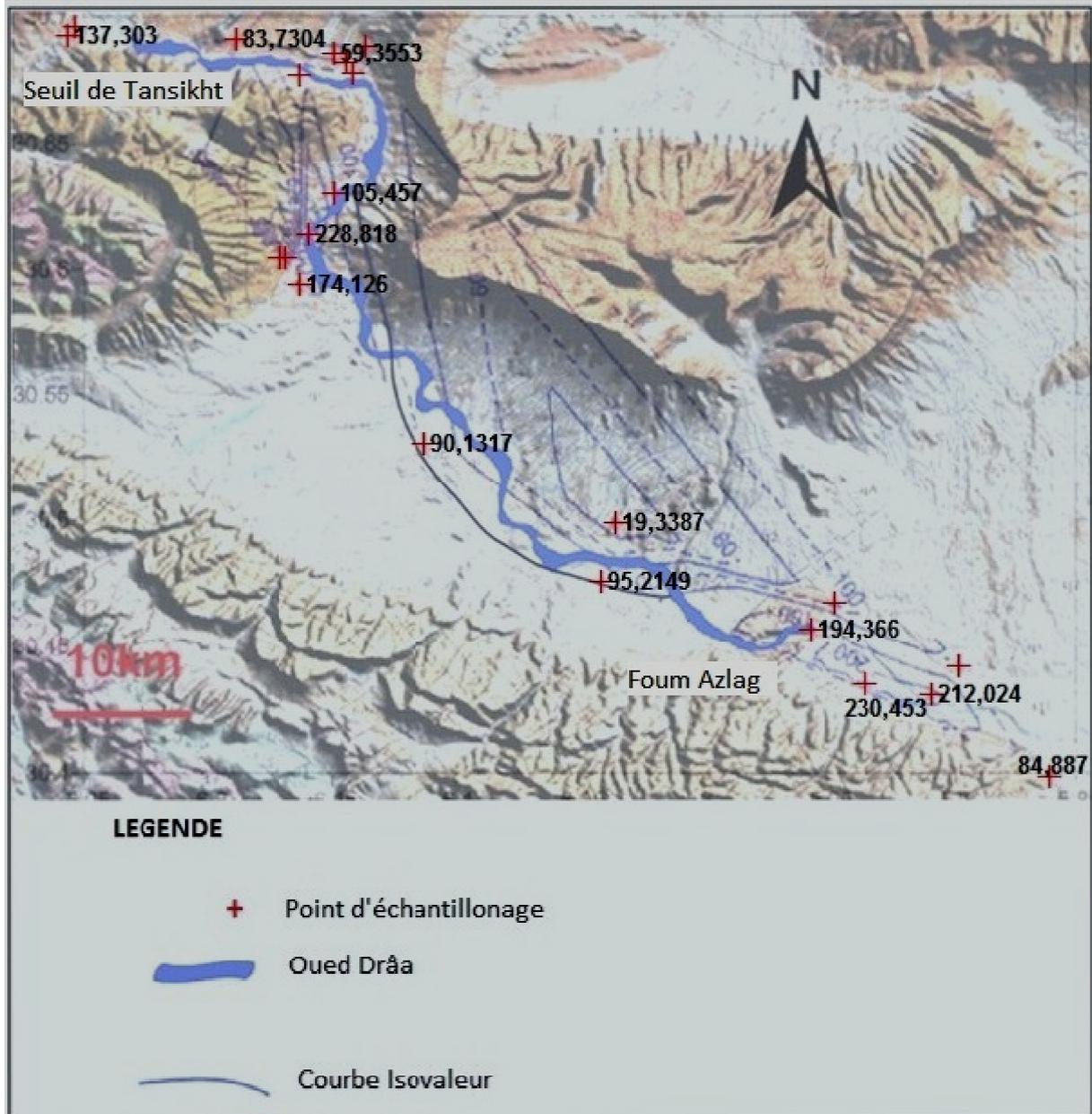


Fig. 19 : Carte en isovaleurs du Magnésium ; les valeurs à côté des points, représentent les concentrations en mg/l pour chaque échantillon

III.2.3.3.4. Répartition des bicarbonates dans les eaux souterraine de l'Oued Draa

La figure en isovaleur ci-dessous montre que les concentrations en bicarbonates sont plus élevées en amont et en aval, elles sont moins élevées au centre. D'une manière générale, on observe une dilution des concentrations depuis les limites aux centres de l'aquifère.

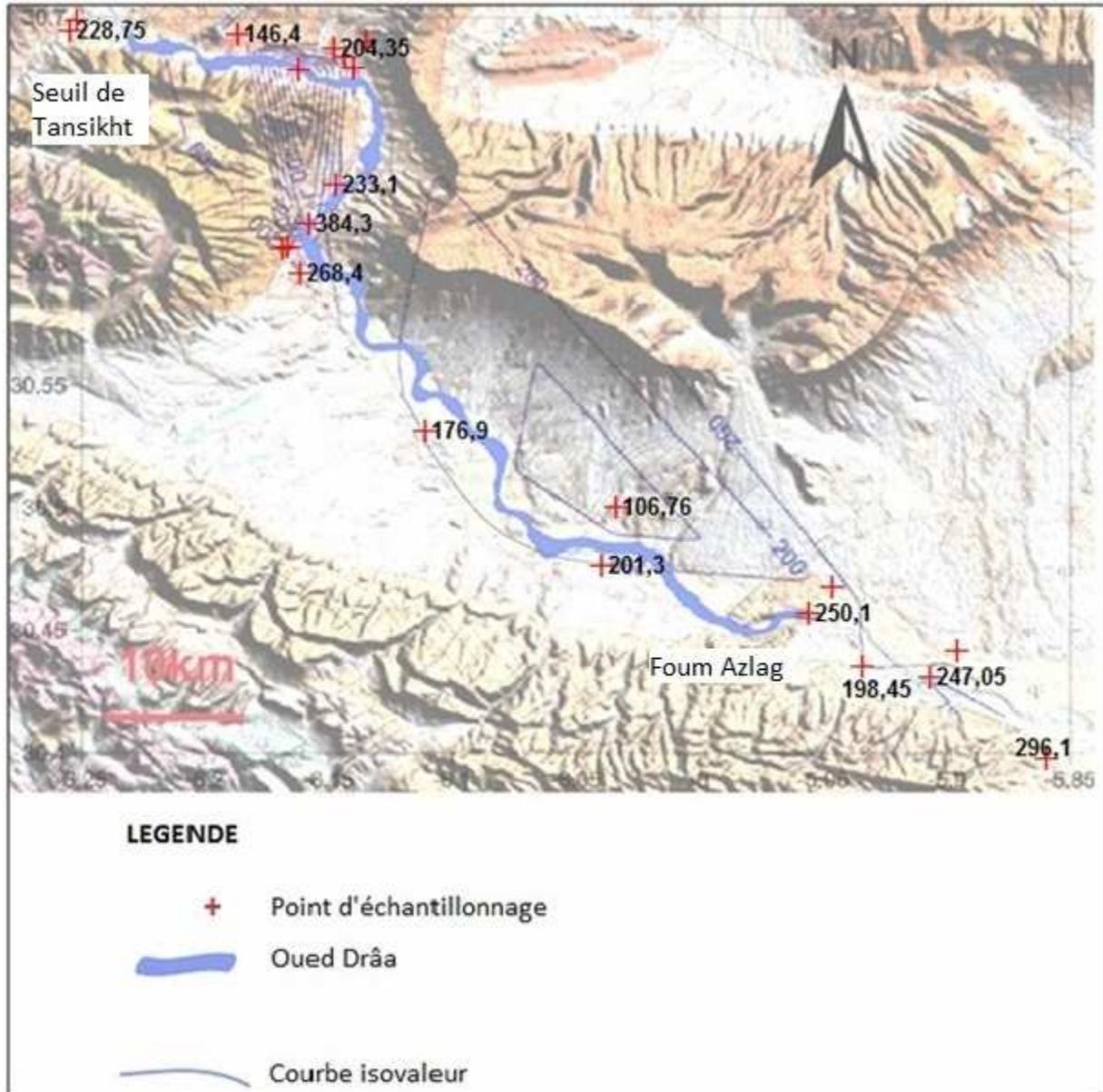


Fig. 20 : Carte en isovaleurs des bicarbonates; les valeurs à côté des points, représentent les concentrations en mg/l pour chaque échantillon

III.2.3.3.5. Répartition du calcium dans l'eau de l'aquifère

La figure 21 montre qu'au niveau des limites de l'aquifère on rencontre les valeurs les plus élevées, par contre dans la partie centrale les valeurs sont faibles.

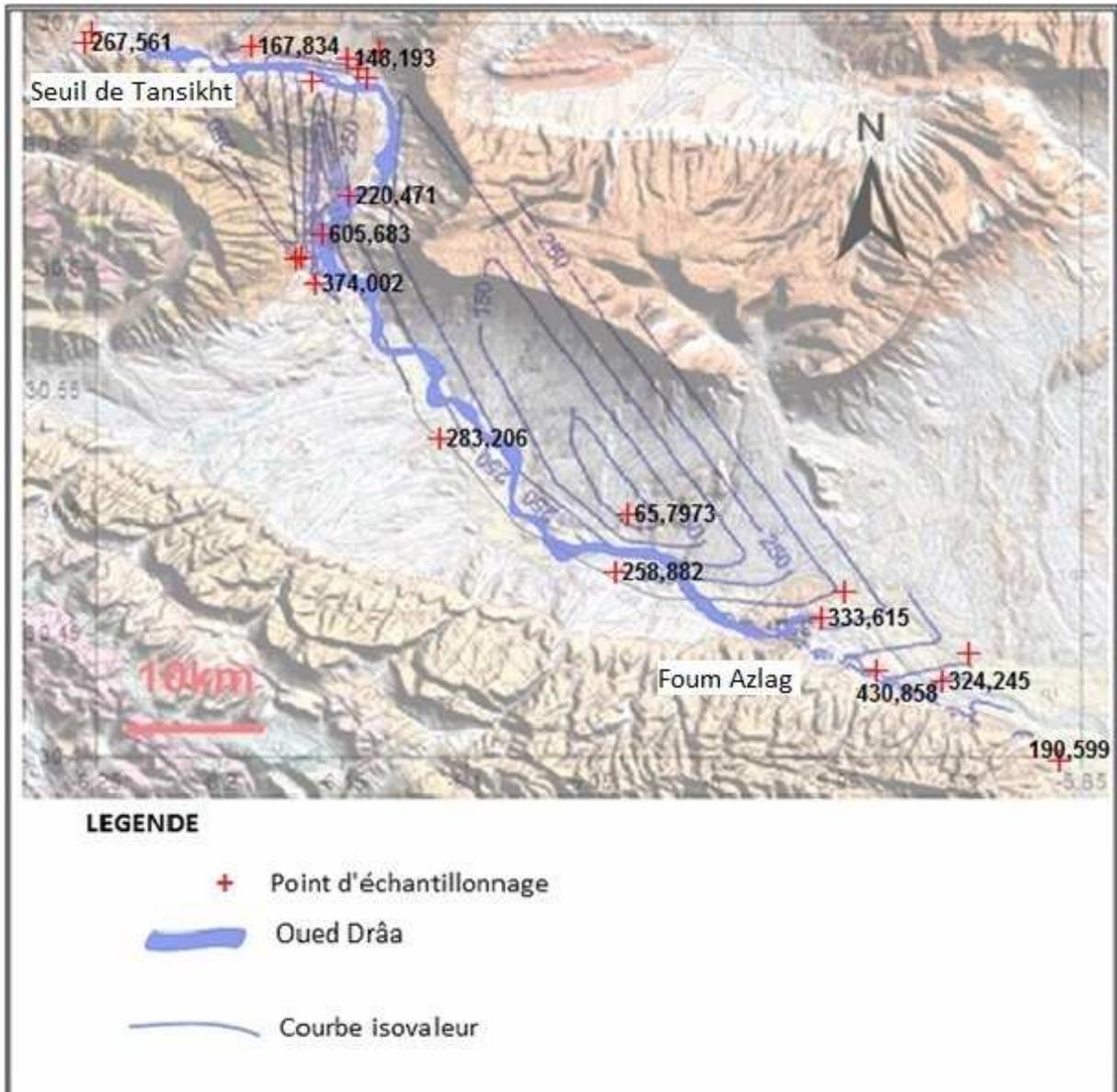


Fig. 21 : Carte en isovaleurs du calcium; les valeurs à côté des points, représentent les concentrations en mg/l pour chaque échantillon

III.2.3.4. Facies chimique et origine de la minéralisation de la nappe de Tinzouline

Afin de comprendre les processus régissant la minéralisation des eaux analysées, plusieurs corrélations ont été réalisées entre le total des ions dissous (TDS) et quelques éléments chimiques K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} (Fig. 22). La contribution du potassium et des bicarbonates est négligeable par rapport à celle des autres éléments de la minéralisation.

Alors que la relation entre les bicarbonates et le TDS d'une part et entre les potassiums et le TDS d'autre part ne sont pas significatives. Les ions bicarbonates sont considérés volatiles.

La minéralisation est liée essentiellement aux ions chlorures, sulfates, calciums, magnésiums et sodium. Les eaux les plus chargées en sels sont les plus riches en chlorures en sulfate et en calcium.

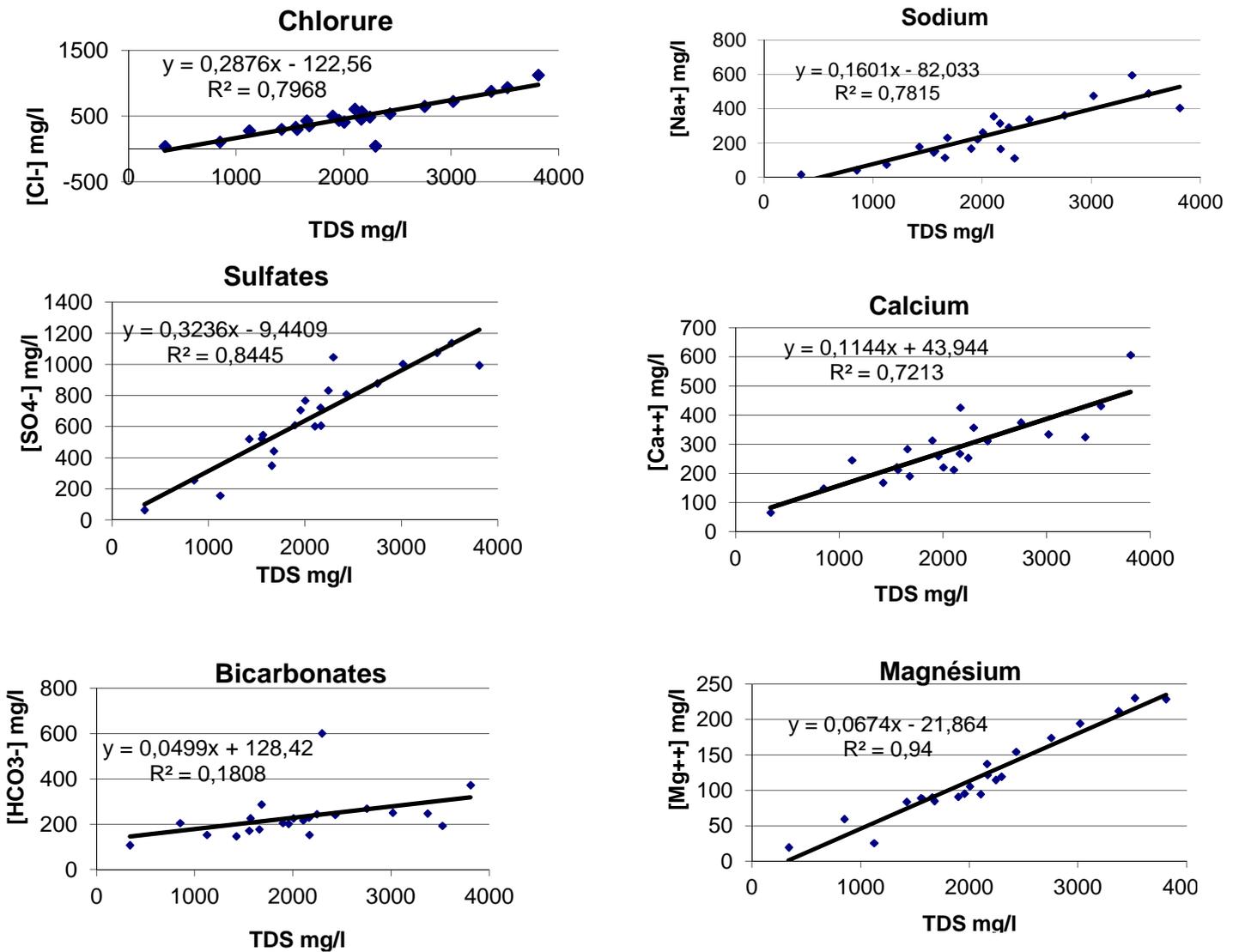


Fig. 22 : Relations entre la minéralisation totale (TDS) des eaux souterraines et quelques éléments chimiques de l'aquifère de Tinzouline.

La figure 22 figure montre que les ions SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} et Mg^{2+} présentent les degrés de corrélation les plus élevés, indiquant une même origine des éléments dissous. Le Mg^{2+} montre un coefficient de corrélation avec TDS le plus élevée ($R=0,94$).

Les concentrations élevées en ions calcium et Magnésium peuvent être expliquées par l'abondance des roches carbonates dans la région du Haut Draa.

L'éléments HCO_3^- présente le coefficients de corrélation le plus faible, son évolution ne montre aucune corrélation significative avec salinité totale. Pour les bicarbonates (HCO_3^-), cette faible corrélation ($R=0,36$) est expliquée par le fait que ces ions sont volatiles et influençables par le contact entre l'eau et l'atmosphère ainsi que par les pressions partielles en CO_2 dissout, qui sont généralement plus élevées au niveau des eaux souterraines, ce qui explique la relative constante des concentrations. (Toughzaoui, 2009).

Afin de déterminer les facies chimiques et les origines de minéralisation des eaux souterraines de la nappe, on a en recours aux représentations graphiques ci-dessous.

III.2.3.4.1. Projection des analyses des eaux de puits sur le digramme de Piper

Le diagramme de Piper est l'un des diagrammes les plus utilisés en hydrochimie dans le but de déterminer les différents faciès des échantillons d'eau analyses. Il est constitué de deux triangles et d'un losange. On distingue :

- ✓ Le triangle des cations (Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++}) : il sert à reporter les pourcentages des cations majeurs pour chaque échantillon d'eau analysée.
- ✓ Le triangle des anions (Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^-) : il sert à reporter les pourcentages des anions majeurs pour chaque échantillon d'eau analysée.

Les pourcentages des éléments majeurs reportés sont calculés à base de concertations exprimées en meq/l.

La projection des échantillons des eaux souterraines sur le diagramme de piper, (Fig. 23) révèle que les eaux souterraines de la nappe de Tinzouline présente un faciès chimique type chloruré sulfaté-calcique à l'exception des certains puits qui ont un faciès sulfaté-calcique.

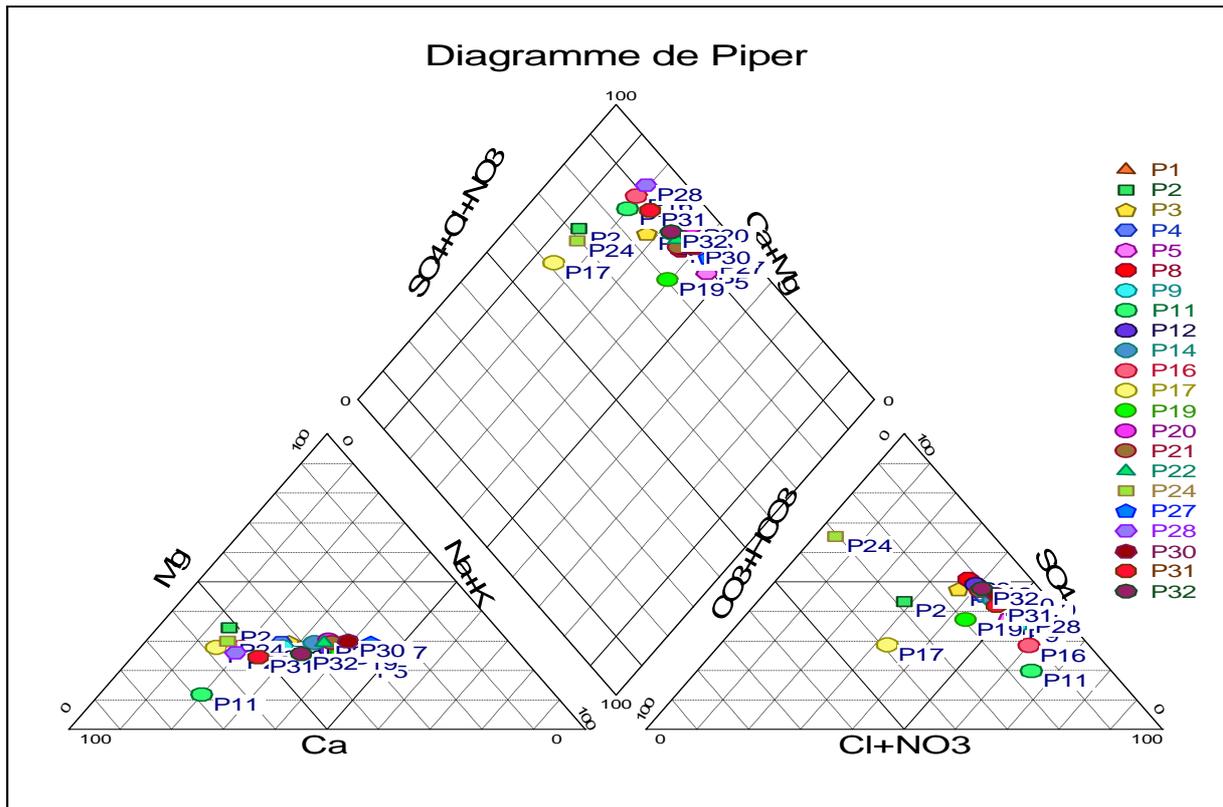


Fig. 23 : projection des analyses chimiques eaux souterraines de la nappe de Tinzouline sur diagramme de piper

III.2.3.4.2. Projection des analyses des eaux de puits sur le diagramme de Scholler :

Le report des données d'analyse chimiques sur ce diagramme, (Fig. 24) prouve une dominance des ions Cl^- , Ca^{+2} et SO_4^{-2} pour tous les puits. Le faciès est chloruré-sulfaté-calcique.

La projection du reste des analyses (fig. 25) montre également la dominance des ions Cl^- , Ca^{2+} et SO_4^{2-} .

Au niveau de P24, P17 et P2 on remarque une concentration élevée des sulfates et en calcium (Fig. 26).

On constate encore que les tracés des échantillons analysés sont parallèles se qui explique que les eaux de ces puits appartiennent à la même famille d'eau.

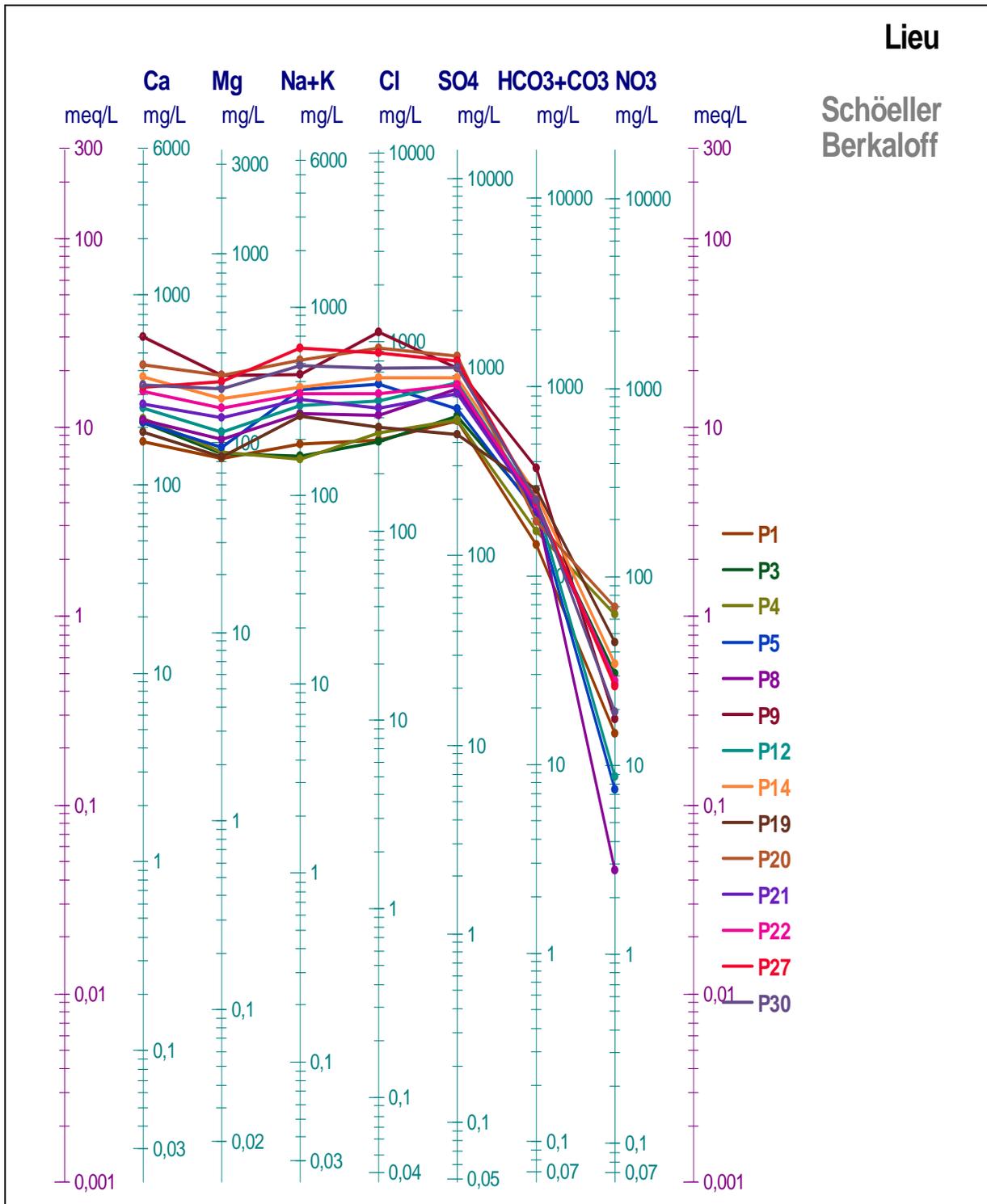


Fig. 24 : Diagramme de Berkaloff-Scholler des eaux de puits de la nappe de Tinzouline

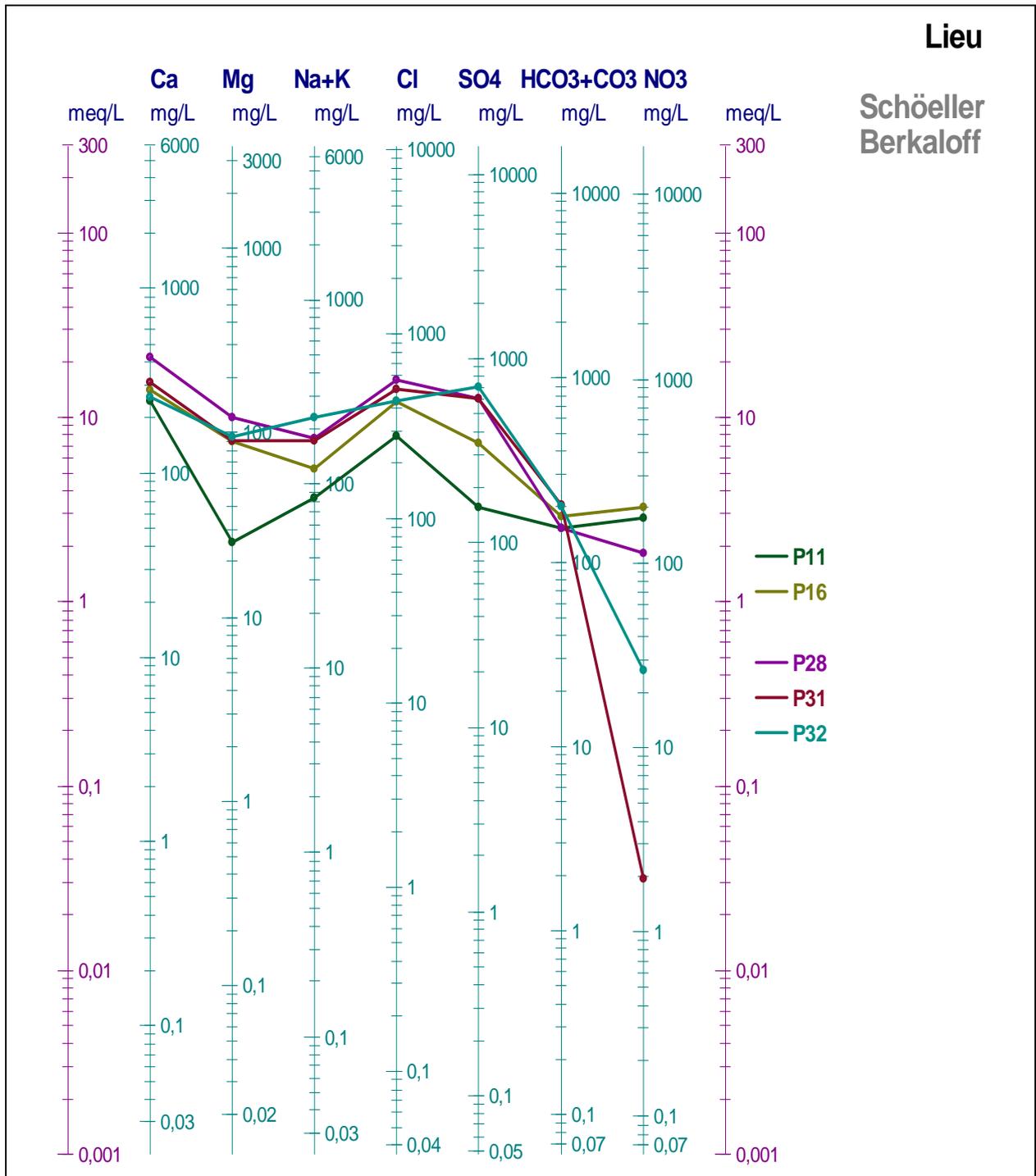


Fig. 25 : Diagramme de Berkaloff-Scholler des eaux de puits de la nappe de Tinzouline (suite)

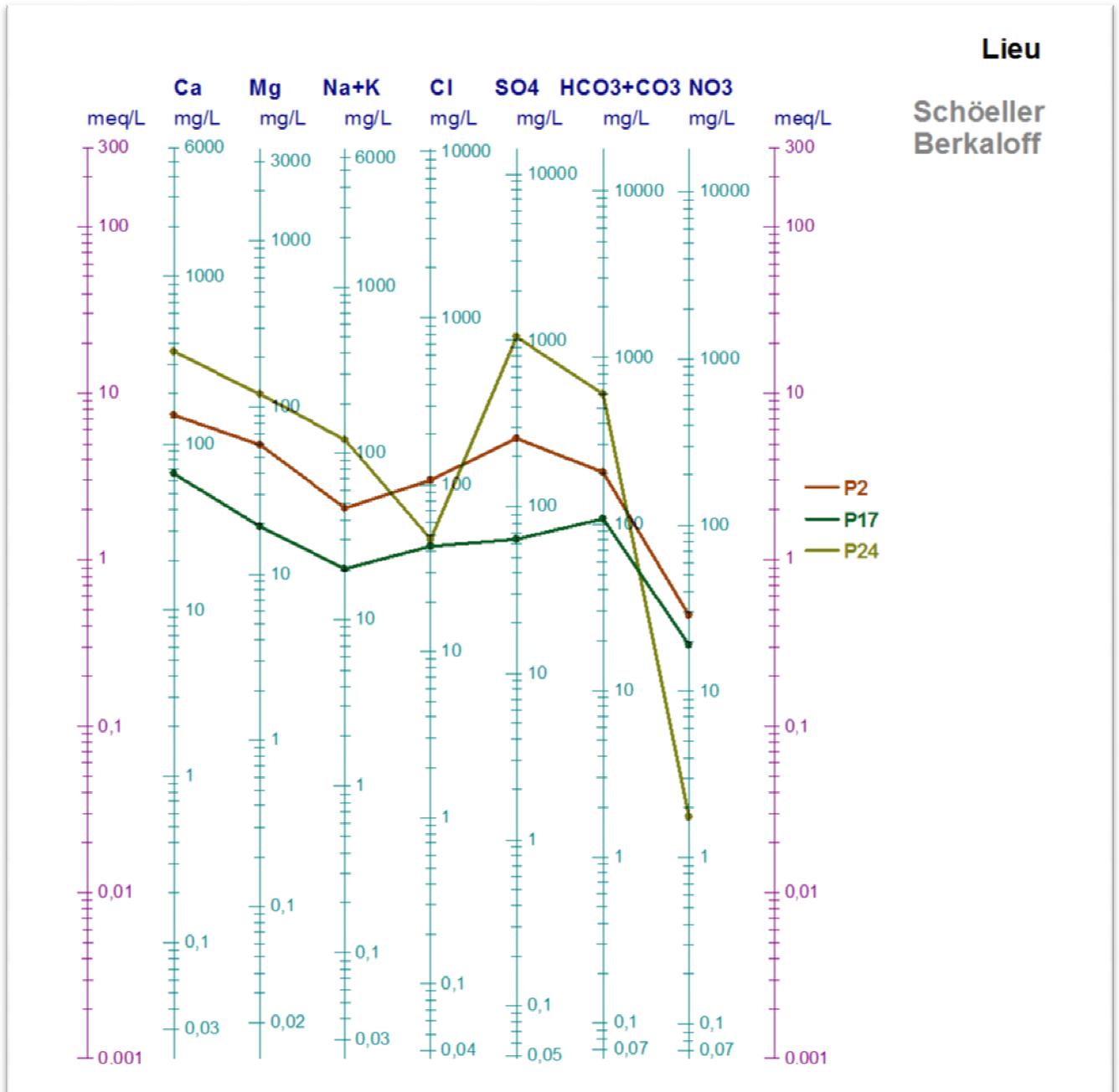


Fig. 26 : Diagramme de Berkaloﬀ-Scholler des eaux de puits de la nappe de Tinzouline

Les eaux assez minéralisées sont localisées aux limites de l'aquifère de la région étudiée et présentent des concentrations élevées en Cl^- (P9 hors de la vallée 1125,28 mg/l) et en SO_4^{2-} (P20 hors de la vallée 1138,61mg/l), comme le montrent les cartes en isovaleurs (cf.fig.17 et fig.18).

La richesse des eaux en Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} et SO_4^{2-} est liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées en sels et par dissolution des formations évaporitiques. On ne peut expliquer cette richesse que par la lithologie locale. En

effet, l'essentiel des eaux chargées dans la nappe, provient des écoulements amont (souterrains et de surface) dans le Haut Atlas. Ce dernier est constitué d'affleurements dont les roches sont d'origine chimiques sédimentaires et magmatiques (cf, Fig. 8). Les éléments dissouts comme Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} et SO_4^{2-} , ne peuvent provenir que par le lessivage des roches du Haut Atlas. Par contre, les éléments Mg^{2+} et HCO_3^- sont liés, probablement, à la dissolution des carbonates du Haut Atlas et du Draa Moyen. Une part importante des solutés proviendrait de l'utilisation des eaux souterraines en irrigation des oasis ce qui engendrerait un recyclage par lessivage répété des sels dissouts dans les sols sous palmeraie, vers l'aquifère.

III.2.3.5. Etat de saturation des eaux de la vallée Draa et détermination des indice des saturation (IS)

Les indices de saturation (IS) traduisent l'équilibre d'une eau par rapport à un minéral. Ils sont obtenus en comparant le produit de solubilité K au produit d'activité ionique (PAI).

Il s'exprime de la manière suivante :

$$IS = \log \frac{PAI}{K}$$

Une eau est dite en équilibre avec un minéral si son indice de saturation est égale à 0, elle est sous saturée si cet indice est inférieur à 0 et sursaturée si IS est supérieur à zéro.

L'indice de saturation exprime le degré d'équilibre chimique entre l'eau et le minéral dans la matrice de l'aquifère et peut être considéré comme une mesure du processus de dissolution ou précipitation traduisant les interactions eau-roche dans la région.

Les indices de saturation (IS) vis-à-vis la calcite (CaCO_3), la dolomite ($\text{Ca, Mg}(\text{CO}_3)_2$), du gypse ($(\text{CaSO}_4)_2\text{H}_2\text{O}$) et de l'halite (NaCl) ont été calculés à l'aide du logiciel PHREEQ. Les résultats de ces calculs sont consignés dans le tableau 4.

- L'étude des indices de saturation des eaux de surfaces vis-à-vis de quelques minéraux tels que l'halite, la calcite, le gypse et la dolomite montrent que les eaux de surface sont sous saturées vis à vis de toutes ces espèces minérales. Par contre l'échantillon 34 montre une légère sursaturation vis-à-vis de la calcite et dolomite.

N°	IS vs. Calcite	IS vs. Dolomite	IS vs. Gypse	IS vs. Halite
6	-0.67	-1.44	-1.18	-6.49
10	-0.16	-0.40	-1.18	-6.49
18	-0.20	-0.46	-1.16	-6.45
23	-0.32	-0.76	-1.19	-6.52
26	-0.02	-0.11	-1.14	-6.42
34	0.12	0.18	-1.15	-6.42

Tab. 4 : Etat de saturation des eaux de surface de l'Oued Draa durant la période du 20 au 21 Mars 2011

- L'étude des indices de saturation des eaux souterraines de la vallée du Draa moyen *vis-à-vis* de mêmes minéraux tableau 5 montré que :
- Toutes les eaux souterraines sont sous saturées *vis-à-vis* de la halite et du gypse. En effet, ces deux minéraux sont considérés comme évaporitiques et donc très solubles. La saturation *vis-à-vis* de ces deux minéraux est surtout rencontrée au niveau des eaux très salées (salures et saumures). Au niveau de la vallée de Draa la minéralisation des eaux souterraine est moyenne à modérée et ne dépasse pas les 5200 μ S/cm.
 - Pour la dolomite (Ca, Mg(CO₃)₂), seuls les eaux des puits P2, P9, P19, P27, P28 et P30 présentent une légère sursaturation. Toutes les autres eaux sont sou saturées *vis-à-vis* de la dolomite.
 - Pour la Calcite (CaCO₃) les mêmes eaux de puits (P2, P9, P19, P22, et P28 à l'exception de P27 qui n'est pas sursature et P30 qui est en équilibre. Les données des indices de saturation des eaux souterraines indiquent que seuls les minéraux carbonatés tendent à précipiter surtout sous la forme de dolomite.

IS N°	IS vs. Calcite	IS vs. Dolomite	IS vs. Gypse	IS vs. Halite
P1	-0.29	-0.57	-0.84	-5.90
P2	0.11	0.13	-1.08	-6.94
P3	-0.24	-0.55	-0.74	-5.97
P4	-0.26	-0.67	-0.73	-5.94
P5	-0.19	-0.37	-0.76	-5.33
P8	-0.23	-0.51	-0.63	-5.61
P9	0.71	1.34	-0.33	-5.04
P11	-0.18	-1.04	-1.11	-6.29
P12	-0.17	-0.38	-0.58	-5.50
P14	-0.10	-0.21	-0.48	-5.30
P16	-0.01	-0.23	-0.82	-5.93
P17	-0.76	-1.80	-1.80	-7.67
P19	0.34	0.63	-0.87	-5.72
P20	-0.12	-0.20	-0.37	-5.03
P21	-0.18	-0.42	-0.60	-5.49
P22	0.01	-0.02	-0.53	-5.39
P24	-0.19	-0.59	-0.36	-6.92
P27	-0.03	0.11	-0.50	-4.97
P28	0.31	0.37	-0.52	-5.68
P30	0.00	0.12	-0.50	-5.15
P31	-0.20	-0.61	-0.59	-5.72
P32	-0.15	-0.45	-0.60	-5.66

Tab. 5 : Indices de saturation des eaux souterraines de la nappe de Tinzouline vis-à-vis de l'halite, gypse, dolomite et calcite (20 et 21 Mars 2011)

III.2.3.6. Analyses en composante principale ACP

III.2.3.6.1. Principe d'ACP

Suite a cette première description des différents paramètres physico-chimiques pris indépendamment les uns des autres, il est intéressant de comparer l'ensemble des points d'eaux entre eux et la totalité de leurs caractéristiques physico-chimiques en utilisant l'analyse en composantes principales (ACP).

III.2.3.6.2. Résultats

Une étude statistique par analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée sur un tableau de 14 variables et de 22 observations (Fig. 27). Le principe de ce traitement a été décrit comme suivant :

	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃ ⁻	F	Cl	Br	SO ₄	PO ₄	NO ₂	NO ₃	Li+	NH ₄
Ca	1													
Mg	0,797	1												
Na	0,537	0,885	1											
K	0,575	0,591	0,498	1										
HCO ₃ ⁻	0,437	0,359	0,163	0,3	1									
F	0,021	-0,031	-0,09	-0,23	-0,1	1								
Cl	0,773	0,866	0,86	0,614	0	-0,03	1							
Br	0,827	0,68	0,496	0,596	0,1	-0,16	0,801	1						
SO ₄	0,702	0,898	0,808	0,43	0,6	-0	0,676	0,416	1					
PO ₄	0,209	0,128	0,102	0,764	0,3	-0,16	0,218	0,267	-0,003	1				
NO ₂	0,181	0,075	0,013	0,679	0,1	-0,36	0,191	0,413	-0,105	0,85	1			
NO ₃	0,077	-0,215	-0,29	-0,02	-0,3	-0,21	-0,037	0,399	-0,407	-0,05	0,31	1		
Li+	0,738	0,479	0,221	0,198	0,5	0,221	0,361	0,403	0,559	-0,05	-0,09	-0	1	
NH ₄	0,668	0,464	0,263	0,723	0,3	-0,12	0,575	0,695	0,277	0,55	0,47	-0	0,23	1

Tab. 6 : Matrice de corrélations

La matrice de corrélation (Tab.6) montre l'existence d'une bonne corrélation entre Mg, Na⁺, Cl⁻, et SO₄²⁻ et une autre corrélation entre Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ et Ca⁺ et une autre entre PO₄ et NO₂⁻.

Cette analyse a été poussée jusqu'à deux facteurs et 63.91 % de la variance ont pu être exprimés. La projection des variables sur le plan I-II montre deux pôles :

- Le facteur I représente 44.43 % de la variance, il est déterminé par K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, NH₄⁺ et HCO₃⁻. Au niveau de l'axe I on remarque que les éléments

potassium et NH_4 sont opposés avec le reste des éléments ce qui peut être expliqué par des origines différents. La corrélation K^+ et NH_4^+ peut être liée à l'utilisation des engrais tandis que le reste des autres éléments peut être relié à la géologie de la région (carbonates, gypse)

- Le facteur II représente 19.48% de la variance et il est déterminé par les NO_3^- Il représenterait le facteur de la pollution azoté

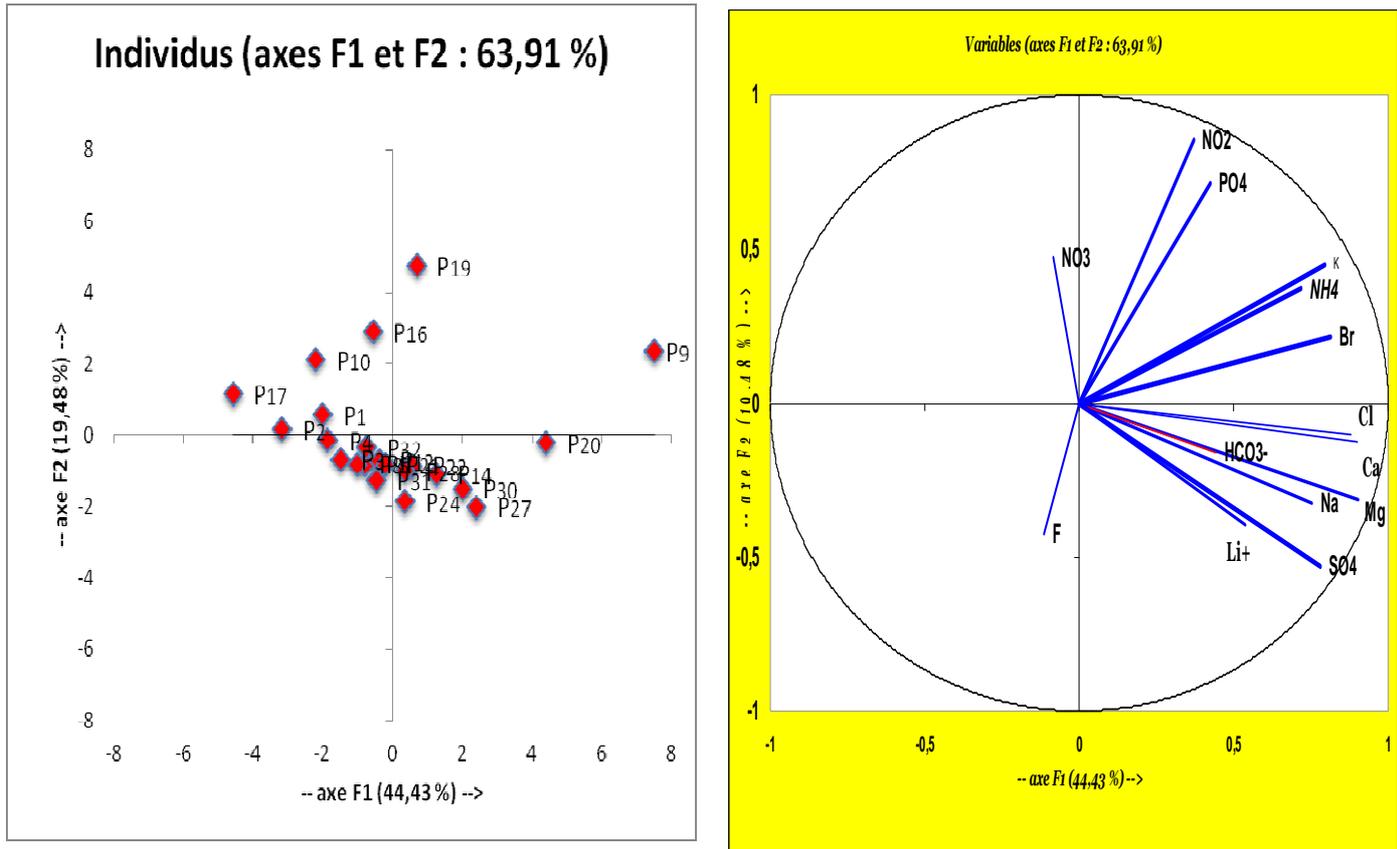


Fig. 27: ACP Plans factoriels F1 / F2 et Représentation graphique des individus

III.3. Conclusion

La salinité des eaux de la nappe est très différente de l'amont vers l'aval, et à l'intérieur de la nappe. Mais à part la concentration des sulfates qui est très significative dans les eaux de surface, tous les éléments dissouts évoluent de la même manière dans les eaux souterraines et de surface à Tinzouline. Il existe donc un héritage de processus de salinisation.

L'alimentation de la nappe de Tinzouline lors des lâchers de barrage ne va pas apporter un changement significatif à l'équilibre ionique des eaux souterraines, mais au contraire peut contribuer au renforcement du phénomène de minéralisation.

La minéralisation est liée essentiellement aux ions chlorures, sulfates, calciums, magnésiums et sodium. Les eaux les plus chargées en sels sont les plus riches en chlorures en sulfate et en calcium.

La salinité des eaux de puits est élevée en générale dans le cas de Tinzouline. La conductivité électrique est préférentiellement plus élevée aux fousms et aux limites latérales par rapport aux zones centrales. Cela s'explique par la géométrie de la nappe, dont le volume est réduit aux limites.

L'analyse des échantillons montre un faciès sulfato-calcique pour les eaux de surface et certaines eaux de puits (P2, P17 et P24), et chloruré sulfato-calcique pour le reste des eaux souterraines.

IV. La Qualité chimique des eaux

Cette partie, utilise les données analytiques disponibles pour évaluer la qualité chimique des eaux de la région, en particulier la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, aux activités agricoles et à l'élevage.

La quasi-totalité des eaux dans la région sont utilisées pour ces deux activités de consommation humaine et agricole.

IV.1. La Qualité chimique des eaux surface

Il est nécessaire de contrôler la qualité des eaux pour les besoins d'approvisionnement en eau potable. L'exploitation des résultats est basée sur la comparaison entre les normes publiées par le Maroc et l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) en 2006 et les données de l'analyse effectuée sur les échantillons précédemment cités.

IV.1.1. Qualité de l'eau destinée à la consommation humaine

Toute eau destinée à la consommation humaine doit être de bonne qualité. Selon l'Organisation Mondiale de la sante (OMS), une eau potable ne doit pas contenir en quantités dangereuses ni substances chimiques ni micro-organismes nocifs pour la santé. Pour cette étude de potabilité des eaux, seule la qualité chimique est prise en compte. Les résultats sont obtenus par comparaison avec les normes marocaines et OMS. A l'exception du sulfate et le calcium (qu'au niveau de l'aval), les éléments sont dans les normes.

Variable	Valeur Maximale Recommandée (VMR)	Valeur Maximale Admissible (VMA)	Valeur Minimale Requise (VmR)	Echantillons répondants aux normes
Potentiel hydrogène (pH)	6.5<pH<8.5	9.2	6	Tous les échantillons
Conductivité $\mu\text{S.cm}$	1300	2700	110	Tous les échantillons
Calcium (Ca^{2+}) en mg/l		100		Tous les échantillons à l'exception puits (26) et (34)
Sodium Na^+ en mg/l	100			Tous les échantillons
Magnésium Mg en mg/l	100			Tous les échantillons
Potassium	12			Tous les échantillons
Nitrates NO_3 en mg/l		50		Touts les échantillons
Chlorures Cl en mg/l	300	750		Tous les échantillons
Sulfates SO_4 en mg/l	200			Tous les échantillons ont dépassé la norme

Tab. 6 : Norme de potabilité de l'eau de point de vu chimique (normes marocaine et OMS en 2006) et les données de l'analyse effectuée sur les échantillons précédemment cités

IV.1.2. Qualité de l'eau destinée à l'irrigation

L'agriculture irriguée est tributaire d'un bon approvisionnement en eau de qualité. On s'est souvent préoccupé de ce dernier aspect parce que, actuellement nous sommes devant plusieurs types de pollution des ressources en eau. La qualité de l'eau destinée à l'irrigation s'est basée sur les aspects chimiques et physiques de l'eau et les autres facteurs tels que les caractéristiques biologiques et organoleptiques (goût, saveur, etc.). Afin d'apprécier l'aptitude des eaux de surface de notre secteur d'étude, on doit donc évaluer leur qualité.

Les sels contenus dans l'eau ou dans le sol réduisent la disponibilité de l'eau pour les plantes aux points de nuire à leurs rendements. L'étude de la salinité est faite selon la méthode de classification des eaux d'irrigation provenant de la nappe phréatique.

La classification de Richard préférentiellement utilisée dans les pays à climat aride et semi aride se base sur le rapport d'absorption du sodium (SAR) et la conductivité électrique à 25C°.

Le SAR est obtenu par la formule suivante :

$$SAR = \frac{Na}{[(Ca + Mg)2]^{0.5}}$$

Les concentrations sont exprimées en méq/l.

Une eau avec un SAR très élevée présente des concentrations importantes en Na échangeable. Ce dernier peut se substituer aux ions alcalino-terreux (Ca et Mg) des argiles et entraîne ainsi l'obturation des pores et une imperméabilisation des sols par suite (Richarde *et al.*, 1959).

Le report des analyses chimiques de l'oued sur le diagramme d'aptitude d'irrigation (Fig. 28) montre que Les eaux de l'oued Draa appartiennent à la classe C3-S1. C'est une eau admissible, convenable à l'irrigation de cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés.

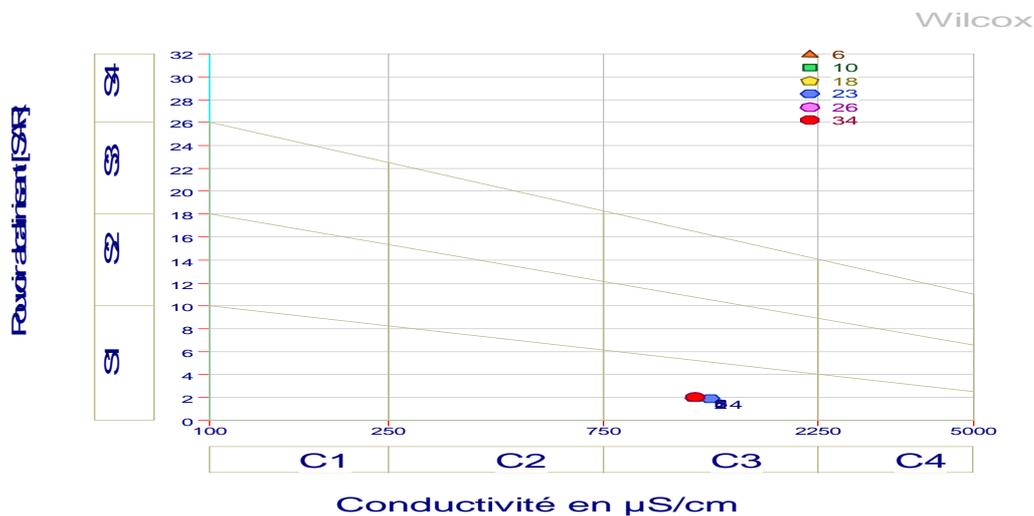


Fig. 28 : Diagramme de la classification de l'eau d'irrigation d'oued Draa

IV.1.3. Qualité de l'eau destinée à l'élevage

Les eaux destinées à l'élevage sont également sujettes à la notion de normes de même que les eaux destinées à la consommation humaine. cependant , la plupart des animaux domestiques peuvent tolérer des eaux à des concentration plus élevées que celles des eaux destinées à l'Homme. Le tableau suivant donne les limites des concentrations à respecter.

Tab.3: Normes relatives à l'élevage d'après Mckenn and Wolf (In Hem, 1985)

Type d'élevage	Concentration maximale en (mg/l)
Volailles	2860
Porcidés	4290
Equidés	6435
Bovidés (production de lait)	7150
Bovidés (production de viande)	10100
Ovidés	12900

Les conductivités d'eau mesurées dans les eaux des surfaces au niveau de vallée du Draa varient entre 1200 μ s/cm et 1300 μ s/cm. Cette conductivité donne une minéralisation maximale des eaux dans la vallée de l'ordre de 910mg/l (Conductivité en μ s/cm*0,7). Cette minéralisation reste inférieure à la valeur maximale. Les eaux de surface de vallée du Draa sont donc considérées de bonne qualité chimique pour l'élevage.

IV.2. La Qualité chimiques des eaux souterraine

La qualité d'une eau se définit par rapport aux utilisations auxquelles elle est destinée. Les eaux souterraines ne sont pas chimiquement « pures » elle renferment toujours une certaine quantité de substances minérales dissoutes qui leur confèrent certaines de leurs caractéristiques, en particulier celles physico-chimiques. La qualité de l'eau est évaluée par l'écart de la constitution d'une eau aux caractéristiques spécifiques de l'utilisation .

IV.2.1. Qualité d'eau destinée à la consommation humaine

Les résultats sont obtenus par comparaison avec les normes marocaine et OMS.

D'après les données du tableau 3 les analyses effectuées montrent que le pH de l'ensemble des échantillons des puits répond aux normes marocaines Sauf le P24 (PH= 6,35) qui peut être expliqué par un effet du transport de l'échantillon.

Neuf puits présentent des conductivités supérieures à la valeur maximale recommandée par les normes marocaines. Ce sont les puits suivants (P4, P9, P12, P14, P20, P22, P27, P28 et P30). La majorité de ces points se situe hors de la vallée en aval. Les valeurs élevées de la conductivité peuvent être expliquées par les concentrations en ions, présents dans les eaux souterraines.

D'un point de vue chimique, les puits P9 (1125,28 mg/l), P20 (934,5mg/l) et P27 (876,9 mg/l) présentent des teneurs plus élevées que la norme sur les concentrations en chlorures. Ces puits se situent dans la partie aval de la vallée et ont eu suffisamment de temps de se charger en chlorures ; élément très mobile et très réactif.

On peut également signaler à ce niveau les concentrations en sulfates relativement plus fortes en aval et en dehors de la vallée (P27 et P20), par les dissolutions des formations riches en gypse.

Pour le potassium les puits qui dépassent la norme (P9, P19 et P21) peuvent trouver l'explication dans l'utilisation des engrais potassiques au niveau de la vallée afin d'améliorer les rendements agricoles.

Tab.4: Norme de potabilité de l'eau de point de vu chimique (normes marocaine et OMS en 2006) et les données de l'analyse effectuées sur les eaux souterraines de la nappe de Tinzouline

Variable	Valeur Maximale Recommandée	Valeur Maximale Admissible	Valeur Minimale Requise	Puits répondants aux normes
Potentiel hydrogène (pH)	6.5<pH<8.5	9.2	6	Touts les puis répondants
Conductivité μ S.cm	1300	2700	110	Tous les puits à l'exception de P4, P9, P12, P14, P20, P22, P27, P28 et P30
Calcium (Ca ²⁺) en mg/l				Tous les puits sont dépasse a l'exception P17
Sodium Na ⁺ en mg/l	100			à l'exception de ce puits P2, P4, P11, P16, P17 et P24 les rester sont dépasse
Magnésium Mg en mg/l	100			Tous les puits à l'exception de P8, P9, P12, P14, P20, P21, P22, P24, P27, P28 et P30
Potassium	12			Tous les puits à l'exception de P9, P19 et P21
Nitrates NO ₃ en mg/l		50		Touts les puis à l'exemption P4, P11, P16, P20 et P28
Chlorures Cl en mg/l	300	750		Tous les puits sont dépasse à l'exception P9, P20 et P27
Sulfates SO ₄ en mg/l	200			Tous les puits sont dépasse à l'exception P11 et P17

Pour les nitrates, on remarque que sur les vingt deux échantillons analysés seuls les puits (P4, P11, P16, P20, et P28) présentent des teneurs supérieures à la valeur maximale admissible par les normes marocaines (50 mg/l). Le reste des points d'eau montrent des teneurs importantes mais conformes aux normes.

Les points d'eau où l'on assiste au dépassement des normes, se trouvent généralement au voisinage et autour des zones urbanisées ainsi que dans les parties de la nappe aquifère se trouvant en contact (hydraulique ou chimique) avec les formations de socle.

IV.2.2. Aptitudes de l'eau à l'irrigation

Le report des puits de la zone d'étude en fonction du SAR et de la conductivité sur le diagramme de Richard permet de dégager les points remarquables suivants:

- Les eaux des puits P1, P2, P3, P4, et P11 appartiennent à la classe C3-S1, ce sont des eaux admissibles.
- Le puits P17 appartient à la classe C2-S1 représente une eau de bonne qualité pour l'irrigation.
- Les eaux des puits P5, P9, P12, P14, P20, P21, P22, P27, et P30 appartiennent à la classe C4-S2. Ce sont des eaux très mauvaise qualité pour l'irrigation. Elles sont les plus abondantes.
- Les eaux des puits P8, P16, P19, P24, P28, P31, et P32 appartiennent à la classe C4-S1 correspondent à une eau mauvaise (Fig. 29).

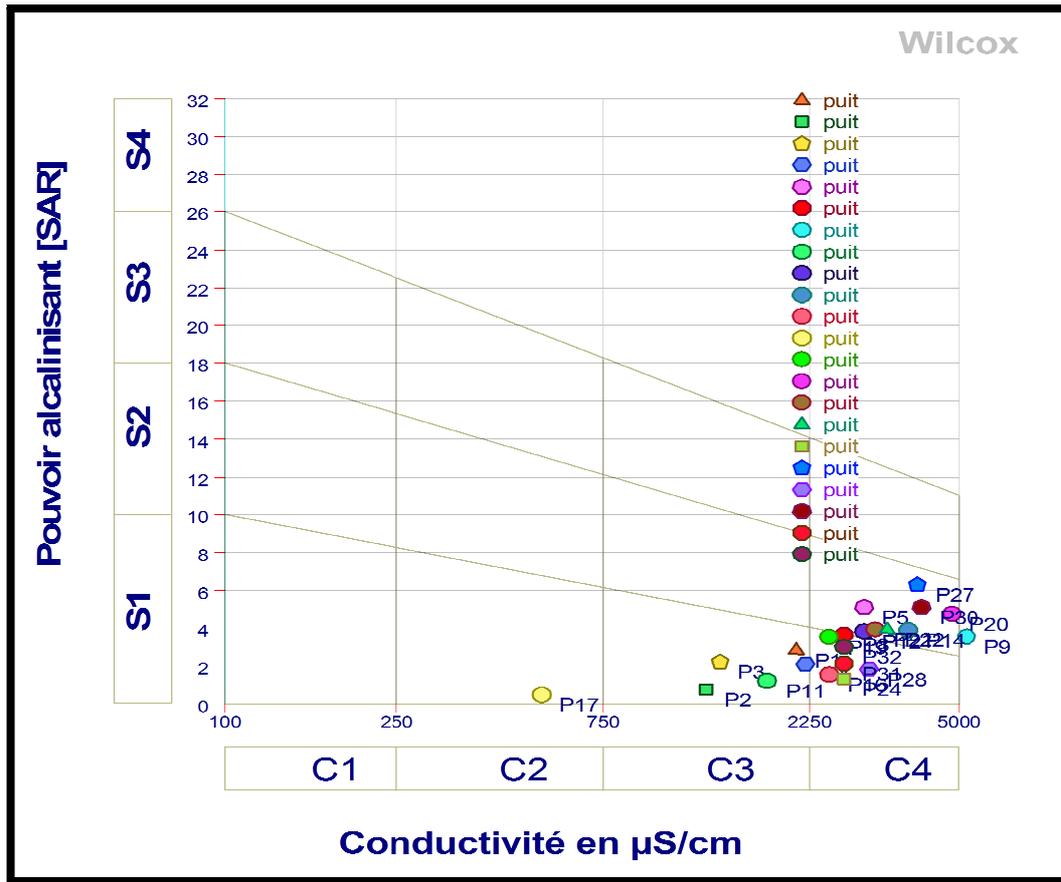


Fig. 29 : Diagramme de la classification de l'eau d'irrigation des eaux souterraines de la nappe de Tinzouline

IV.2.3. Qualité de l'eau destinée à l'élevage

Les conductivités mesurées au niveau des eaux souterraines montrent que la valeur la plus importante a été enregistrée pour l'échantillon P9 ($5200\mu\text{s}/\text{cm}$). Cette conductivité donne une minéralisation des eaux souterraines de l'ordre $3640\text{mg}/\text{l}$ (conductivité en $\mu\text{s}/\text{cm} \times 0,7$) qui reste inférieure à la valeur maximale. En conclusion, les eaux souterraines de la vallée de Draa Moyen sont de bonne qualité pour l'élevage.

IV.3. CONCLUSION

D'un point de vue chimique les eaux de surface de l'oued Drâa à Tinzouline, montrent une bonne qualité pour irrigation et l'élevage.

Par contre, pour la consommation humaine, tous les éléments sont dans la norme à l'exception des sulfates et du calcium. Ce dernier ne dépasse la norme qu'au niveau de l'aval.

D'un point vu chimique, les eaux souterraines sont de qualité moyenne, sauf les puits situés dans les limites de l'aquifère et en aval qui sont de mauvaise qualité, dû à la forte minéralisation issue des éléments chimiques dissouts.

Pour l'élevage les eaux souterraines de Tinzouline, ont des qualités admissibles.

Pour l'agriculture, on relève trois types d'eaux :

- Une eau de bonne qualité représentée par le puits 17,
- Des eaux de qualité admissible, représentée par P2, P3, P4 et P11,
- Des eaux de mauvaise qualité pour le reste des puits.

V. Conclusion générale

L'étude physico-chimique des eaux, tant de surface que souterraines, a permis de déterminer les faciès chimiques des eaux qui sont chlorurés sulfatés calciques.

L'utilisation des éléments chimiques majeurs en fonction des éléments totaux dissous et de l'indice de saturation, a permis de comprendre le processus de minéralisation des eaux. Ainsi, cette minéralisation proviendrait de la dissolution et de la précipitation de la roche aquifère, des évaporites et de l'échange de base des roches carbonatées et des alluvions que renferme l'aquifère principal.

La conductivité est généralement élevée. Elle varie entre (540 et 5200 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les zones les plus chargées sont en liaison directe avec la minéralisation. Cette salinité est surtout contrôlée par les sulfates et le magnésium.

Les répartitions des éléments majeurs, ont permis de voir que la minéralisation s'accroît aux limites de l'aquifère et en aval et moins concentrée au centre.

Les eaux de surface sont riches en sulfates et en calcium, pour cela leur faciès chimique est de type sulfaté calcique. Cela peut être expliqué par la dissolution des formations gypsifères et par la dissolution des affleurements carbonatés (calcaires et dolomies). Les éléments chimiques montrent une augmentation de l'amont vers l'aval pour les eaux de surface.

Les eaux souterraines sont plus minéralisées que les eaux de surface. La qualité chimique des eaux de la région montre :

- Pour les eaux de surface : l'eau de l'Oued Drâa est de mauvaise qualité pour la consommation humaine, parce que la concentration en sulfate dépasse 250 mg/l et admissible pour l'agriculture et l'élevage.
- Les eaux souterraines de Tinzouline montrent, en terme de potabilité, une qualité moyenne, pour la majorité des puits à l'intérieur de la vallée et de mauvaise qualité pour les puits situés aux limites de l'aquifères. Cela est dû à la forte minéralisation et contamination de certains puits par les nitrates. Ces eaux sont, en général, de mauvaise qualité pour l'irrigation à l'exception du puits 17 et certains puits. Ces eaux sont tout de même, de bonne qualité pour l'élevage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agoussine M. 2003. Les divers aspects de l'hydrologie en régions arides et semi arides - cas du sud-est marocain. Terre & Vie, Rabat, 70.

Agoussine M. Hydrogéologie des milieux arides et semi arides marocaine : Cas des Oasis de Skoura et de Foum Zguid (Bassin du Draa –Maroc).

Agoussine M., Saidi M., Igmoullan B., 2004. Reconnaissance des ressources en eau du bassin d'Ouarzazate (Sud-est marocain) Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, n°26, 81-92.

Ambroggi R. et Choubert G. 1952. L'extrême sud du Maroc : 2. Anti- Atlas et vallée du Drà, in Hydrogéologie du Maroc e. *Notes et M. Sers'. géol. Marne n° 97 et 19e Congr géol. intern.* Alger. Monogr. Région, 3e série, n° 4. pp. 323-335.

Archambault C. et Etienne H. 1972. Compte-rendu de la tournée dans le centre régional d'Ouarzazate des 9 et 11 mars 1972. Rapp. inéd. N1TPC/DH/DRE. 14 pp

Benaabidate L. 2000. Caractérisation du bassin versant de Sebou : hydrogéologie qualité des eaux et géochimie des sources thermales. Thèse de doctorat d'Etat, Université Mohamed Ben Abdallah, Fès, 250p.

Boukhari K. et Manaouch M. 2006. Contribution à l'étude hydro chimique et sédimentologique des lacs aguelmame azigaza et dayet iffer (moyen –atlas, Maroc. Mémoire de fin d'études faculté des sciences et techniques Marrakech 32p.

Centre National de la Recherche Scientifique (Paris) et Direction des Mines et de la Géologie (Rabat) 1970. Colloque international sur les corrélations du Précambrien (2 au 23 mai 1970). Livret guide de l'excursion Anti-Atlas occidental et central. *Notes et M. Sers. géol. Maroc.* n° 229, 259 pp.

Centre National de la Recherche Scientifique (Paris) et Direction des Mines et de la Géologie (Rabat) 1972. Actes du colloque international sur les corrélations du Précambrien, (2 au 23 mai 1970). *Notes et M. Sire. ,geol. Maroc.* n° 236. 390. Pp

Chamayou J. 1966. Hydrogéologie de la vallée du Drâ moyen. Rapp. inéd. MTPC/DH/DRE et Thèse de doct. Université de Montpellier, 231 pp.. 53 fig.. 5 cartes hydrogéol. polychromes au 1/50.000 (Tinzouline, Ternata. Fezouata. Ktaoua. NUFlamid).

Chamayou J. 1971. Projet de barrage à Zaouia NOurbaz. Rapp. inéd. MTPC/DH/DRE, 20 pp.

Chamayou J., Combe M., Dupuy J.-C. 1977. Ressources en Eau du Maroc, Tome 3, Domaines atlasique et sud-atlasique. Ministère du Commerce, de l'Industrie, des minérales et de la Marine Marchande, Direction des Mines, de la Géologie et de l'Energie, Division de la Géologie. Maroc.

Chemseddine E., Boudoukha A., Rouabhia A., Salameh E. 2009. Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-Laouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien) Afrique SCIENCE 05(2) (2009) 217 - 231ISSN 1813-548X.

Cheihani S. (2011) Modèle hydrogéologique conceptuel de la nappe phréatique de l'oasis de Tinzouline, Zagora, Sud-est du Maroc- mémoire fin d'études. Université Cadi Ayyad faculté des sciences Semlalia Marrakech .75p.

Choubert G. 1963. Histoire géologique du Précambrien de l'Anti-Atlas. Tome I. *Notes et M. Sers'. géol. Maroc.* n° 162. 352 pp. 33.

Derdabi M., Bellaachia A. 2008. Hydrogéologie et hydrochimie des eaux de la nappe phréatique de la région de tnine ourika-mémoire fin d'études. Université Cadi Ayyad faculté des sciences Semlalia Marrakech .62p.

Diekkrüger B., Busche H., Born K., Klose A., Klose S., Rademacher C., Reichert B., Piecha K., et Schulz O. 2008. Hydrological Processes within the Drâa Basin (Morocco) and their Future Development under Global Change. GLOWA Conference Ouagadougou, 25th – 28th August 2008.

Dindane K. 2005. Apports des techniques hydrogéochimiques et isotopiques à la compréhension des systèmes aquifères des régions arides et semi arides : Application à la nappe du Souss amont(sud-ouest du Maroc) . Thèse de doctorat en sciences université Ibn Zohr faculté des sciences d'Agadir. 175p.

Dupuy 1969. Hydrogéologie de la vallée du Drâ. Rapp. inéd. MTPC/DH/DRE, 30 pp., 2 cartes hydrogéol. au 1/50.000 en annexe (Fezouata et Ktaoua par J. Chamayou, J.C. Dupuy M. Marion).

Genetier B. 1968. Vallée du Dra, palmeraie de Tinzouline. Analyse des essais de pompage des forages 279 à 283/64 et 834 à 839/73. Rapp. inéd. MTPC/DH/DRE. 29 pp.

Hsissou Y., Chauve P., Mania J., Mangin A., Bakalowicz M. et Gaiz A. 1996. Caractérisation des eaux de l'aquifère turonien du bassin du Tadla (Maroc) par le rapport des concentrations molaires Sr^{2+}/Ca^{2+} . Jour. Hydro. Pp 445-451.

Khalil N. 2002. Démarche méthodologique pour une meilleure connaissance de l'hydrologie et de la géochimie des aquifère de moyen montagne :cas du Haut bassin de l'oum er rbia (moyen -atlas, maroc). Thèse de docteur d'état universités Cadi Ayyad faculté des sciences Semlalia, Marrakech,196p.

Lakhal, A. 2007. Impact des margines sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines du Haouz de Marrakech (Tamsloht et Tnine Ourika). DESA Université Cadi Ayyad facultés des sciences Semlalia Marrakech. 49p.

Mariem, Wehba 2008. Etude de la qualité de l'eau distribuée à Nouakchott : impact du système de canalisation, F.S.T, Nouakchott.

Marion M. 1973. Vallée du Dra. Lachures du barrage Mansour-Eddahbi résultats des campagnes de mesures de février - mars - avril 1973. Rapp. inéd. MTPC/DH/DRE. 50 pl).

Meilhac A. 1971. Alimentation en eau potable du M'Hamid. Exploitation du puits 550/82. Rapp. inéd. MTPC/DH/DRE. 3 pp.

Meilhac A. 1971. Reconnaissance géologique et hydrogéologique barrage de prise de Tansikht. Rapp. ined. MTPC/DH/DRE. 42 p.

ORMVAO 1995. Etude d'amélioration de l'exploitation des systèmes d'irrigation et de drainage de l'ORMVAO. Vol. 1.

Ouyse S. 2005. Contribution à l'étude des ressources en eau dans la vallée du Draa moyen (Province de Zagora) : risques de salinité des eaux souterraines et du sol dans l'oasis

de Mezguita. Diplôme des études supérieures approfondies. Université Ibn Tofail faculté des sciences de kénitra.79p.

Schulz, O. Judex M. 2008. IMPETUS Atlas du Maroc. Résultats de Recherche. Troisième édition. Institut de Géographie, Université de Bonn, Allemagne. 20pp.

Semega. B. M., 1995. Interactions physico-chimiques des eaux de la nappe côtière du Trarza (Mauritanie) à Idini et le long du littoral sud. thèse de doctorat, Université de Nice, 232 pages

Séméga B. M., (1999). Nappe Continental Terminal du Trarza (Mauritanie) dans le contexte du bassin sédimentaire côtier sénégal-mauritanien et Etude expérimentale en laboratoire du transport de matière en milieu poreux saturé d'eau douce ou d'eau salée. Mémoire de rapport de stage post-doctoral, Laboratoire "Morphodynamique Continentale et Côtière", Faculté des Sciences, Université de Rouen, 117 pages.

STUDI 2007. Alimentation en eau potable de Nouakchott « renforcement des infrastructures de production », rapport préliminaire.

Toughzaoui S. 2009. Influence de la pollution générée par les déchets solides la mine de khittara- Faculté Sciences et Techniques Marrakech, 101p.

Youbi L. 2008. Comment mieux maîtriser l'irrigation pour augmenter son efficacité et optimiser l'utilisation de l'eau ? (cas des oasis du sud-est du Maroc), revue hte n°141.

SITES WEB

<http://www.impetus.uni-koeln.de/iida>

Annexe 1 : base de données préliminaire de la campagne piézométrique du 20 au 21 mars 2011

date	localité	position par rapport à la vallée	observations	nature	N°echantillon	nP	PT	X(latitude)	Y(longitude)	Z(altitude)	T°C	cond mS/Cm	pH
20/03/2011	ikh n'ouzrou	RG hors vallée	puits avec margelle	puits	1	9,95	11,5	30°41'29,0"	6°11'19,5"	861	23	2,1	7,2
	Ait Hamou1	RG hors vallée	puits avec margelle	puits	2	15,05	16,3	30°41'09"	6°8'49,3"	871	21	1,3	3,6
	Ait Hamou2	RG hors vallée	puits avec margelle	puits	3	10,6	14,55	30°40'58,8"	8°36'0,2"	870	19	1,4	4,7
	Ait Hamou3	RG hors vallée	sur des schistes avec margelle	puits	4	14,12	18,55	30°04'04"	6°8'20,8"	873	25	2,2	4,4
	Ait Hamou4	RG.Int. Vallée	sol conglomératique et sableux	puits	5	7,7	8,55	30°40'55,4"	6°08'31,3"	868	22	3	6,4
	Ait Hamout	lâché de barrage		oued	6			30°39'47,2"	6°07'57,1"	859	18	1,2	1,2
	Tamelalt	RG hors vallée	sol schisteux	sondage	7	7,95	71	30°39'31,7"	6°07'49,4"	868	26	1,4	3,1
	El Modaa	RG.Int. Vallée	sol conglomératique et sableux avec margelle	puits	8	7	9,05	30°37'48,1"	6°08'46,3"	842	22	2,7	1,1
	Taakelt	RG hors vallée	sol schisteux pas de margelle	puits	9	10,35	12,95	30°36'50,5"	6°09'24,2"	849	20	5,2	1,2
	oued draa	lâché de barrage		oued	10			30°37'15,1"	6°09'45,6"	840	19	1,2	1,4
	Ouled Athman	RD hors vallée	puits de la mosquée avec margelle	puits	11	21,95	26,6	30°36'15,3"	6°10'03,8"	881	25	1,8	0,6
	Ouled Athman	RD.Int. Vallée	avec margelle, puits d'exploitation agricole	puits	12	8,4	11,15	30°36'16,8"	6°09'55,9"	881	21	3	3
	Ouled Mogadem	RD hors vallée	puits avec margelle	puits	13	11,45	16,9	30°35'32,5"	6°09'38,5"	853	22	1	3,7
	Ouled Mogadem	RD.Int. Vallée	puits avec margelle	puits	14	7,85	10,05	30°35'37,3"	6°09'38,1"	855	21	3,8	3,8
	Ouled Sliman	RD hors vallée	sol conglomératique et sableux	puits	15	23,35	31,95	30°34'43,3"	6°09'06,8"	866	22	1,3	4,5
	Kesbat el mahzan	RD hors vallée	sol schisteux puits avec margelle	puits	16	10,9	14,1	30°31'48,6"	6°06'33,8"	827	23	2,5	0,7
	Zorgane	RD hors vallée	sol schisteux puits avec margelle	puits	17	16,3	20,9	30°29'55,7"	6°01'58,2"	829	25	0,54	8,4
	oued draa	lâché de barrage		oued	18			30°29'00,1"	6°02'34,3"	799	20	1,2	3,4
21/03/2011	tissergat	RD.Int. Vallée	puits avec margelle	puits	19	7,2	10,95	30°23'49,3"	5°51'30"	754	18	2,5	5,3
	Malal	RD hors vallée	sol conglomératique et sableux puits avec margelle	puits	20	17,45	19,15	30°26'0,3"	5°55'57,3"	776	19	4,8	5,2
	Tamkeselt (amont)	RD hors vallée	sol conglomératique et sableux puits avec margelle	puits	21	9,26	13,7	30°41'46,6"	6°15'11,4"	891	21	3,2	6,7
	Tamkeselt (amont)	RD.Int. Vallée	sol conglomératique et sableux puits avec margelle	puits	22	9,15	13,2	30°41'48,8"	6°15'02,6"	991	22	3,4	5,4
	Tamkeselt (amont)	lâché de barrage		oued	23			30°41'43,6"	6°14'20,0"	878	16	1,3	6,7
	Tamzmout	RD hors vallée	sol conglomératique et sableux puits avec margelle	puits	24	7	8,55	30°40'37,3"	6°09'40,0"	872	18	2,7	6,3
	Tinzouline	RD hors vallée	sol schisteux puits avec margelle	puits	25	8,55	10,6	30°31'02,6"	6°08'02"	829	24	0,63	5,5
	Bni Zoli (aval)	lâché de barrage		oued	26			30°25'23,8"	5°44'31,2"	769	19	1,2	1,5
	Bni Zoli (aval)	RG.Int. Vallée	sol conglomératique et sableux avec margelle	puits	27	5,45	18,55	30°25'48,1"	5°54'19,30"	775	21	4	3,2
	Bni Zoli (aval)	RG hors vallée	sol schisteux puits avec margelle	puits	28	12,45	23,65	30°26'28,6"	5°53'41,8"	760	23	3,1	4,9
	Aghlane Fougani	RG hors vallée	sol greseux puits avec margelle	puits	29	11,9	18,29	30°28'10,1"	5°57'00,9"	793	25	0,75	0,6
	Aghlane Fougani	RG.Int. Vallée	pas de margelle	puits	30	7,75	12,75	30°27'20,9"	5°57'16,0"	795	21	4,1	0,2
	Aghlane Fougani	RG hors vallée	pas de margelle	puits	31	17	23,1	30°28'00,3"	5°56'42,2"	787	17	2,7	0,4
	Ouled sultane	RD hors vallée	sol schisteux puits avec margelle	puits	32	12,25	25,65	30°28'30,3"	6°02'16,8"	808	26	2,7	1,6
	Ouled sultane	RD.Int. Vallée	puits avec margelle	puits	33	8,2	11,2	30°28'14,3"	6°01'21,8"	803	23	3,8	3,7
	oued draa	lâché de barrage		oued	34			30°27'23,2"	6°00'15,5"	784	20	1,2	5,3

Annexe 2 : base de données améliorée avec remesure du pH, conversion des coordonnées GPS en coordonnées décimales et calcul de la côte piézométrique NP et l'épaisseur de la nappe

date	localité	position par rapport à la vallée	observations	nature	N°echantillon	nP	PT	X(longitude)	Y(latitude)	Z(altitude)	T°C	cond mS/Cm	pH	pH_mesuré	NP	Ep eau	
20/03/2011	ikh n'ouzrou	RG hors vallée	puits avec margelle	puits	1	9,95	11,5	-6,18597227	30,69138892	861	23	2,1	7,2	7,03	851,05	1,55	
	Ait Hamou1	RG hors vallée	puits avec margelle	puits	2	15,05	16,3	-6,14698061	30,68583336	871	21	1,3	3,6	7,29	855,95	1,25	
	Ait Hamou4	RG.Int. Vallée	sol conglomératif et sableux	puits	5	7,7	8,55	-6,14202774	30,68205554	868	22	3	6,4	6,87	860,3	0,85	
	Ait Hamout	lâché de barrage		oued	6			-6,13038892	30,65880555	859	18	1,2	1,2	6,97	859	0	
	Tamelait	RG hors vallée	sol schisteux	sondage	7	7,95	71	-6,13038892	30,65880555	868	26	1,4	3,1	6,93	860,05	63,05	
	El Modaa	RG.Int. Vallée	sol conglomératif et sableux avec margelle	puits	8	7	9,05	-6,14619445	30,63002781	842	22	2,7	1,1	6,9	835	2,05	
	Taakelt	RG hors vallée	sol schisteux pas de margelle	puits	9	10,35	12,95	-6,15672226	30,61402773	849	20	5,2	1,2	7,21	838,65	2,6	
	oued draa	lâché de barrage		oued	10			-6,16266662	30,62086108	840	19	1,2	1,4	7,52	840	0	
	Ouled Athman	RD hors vallée	puits de la mosquée avec margelle	puits	11	21,95	26,6	-6,16772218	30,60424998	881	25	1,8	0,6	6,89	859,05	4,65	
	Ouled Athman	RD.Int. Vallée	avec margelle, puits d'exploitation agricole	puits	12	8,4	11,15	-6,16552776	30,60466662	881	21	3	3	6,86	872,6	2,75	
	Ouled Mogadem	RD hors vallée	puits avec margelle	puits	13	11,45	16,9	-6,16069443	30,59236115	853	22	1	3,7	7,28	841,55	5,45	
	Ouled Mogadem	RD.Int. Vallée	puits avec margelle	puits	14	7,85	10,05	-6,16002778	30,59369445	855	21	3,8	3,8	6,72	847,15	2,2	
	Ouled Sliman	RD hors vallée	sol conglomératif et sableux	puits	15	23,35	31,95	-6,15188889	30,57869444	866	22	1,3	4,5	7,4	842,65	8,6	
	Kesbat el mahzan	RD hors vallée	sol schisteux puits avec margelle	puits	16	10,9	14,1	-6,10938894	30,53016671	827	23	2,5	0,7	7,04	816,1	3,2	
	Zorgane	RD hors vallée	sol schisteux puits avec margelle	puits	17	16,3	20,9	-6,03283335	30,49880554	829	25	0,54	8,4	6,96	812,7	4,6	
	oued draa	lâché de barrage		oued	18			-6,04288893	30,48336111	799	20	1,2	3,4	7,42	799	0	
	21/03/2011	tissergat	RD.Int. Vallée	puits avec margelle	puits	19	7,2	10,95	-5,85833333	30,39702777	754	18	2,5	5,3	7,36	746,8	3,75
		Malal	RD hors vallée	sol conglomératif et sableux puits avec margelle	puits	20	17,45	19,15	-5,9325833	30,43416666	776	19	4,8	5,2	6,84	758,55	1,7
Tamkeselt (amont)		RD hors vallée	sol conglomératif et sableux puits avec margelle	puits	21	9,26	13,7	-6,25316662	30,76294445	891	21	3,2	6,7	6,91	881,74	4,44	
Tamkeselt (amont)		RD.Int. Vallée	sol conglomératif et sableux puits avec margelle	puits	22	9,15	13,2	-6,25072223	30,69691666	991	22	3,4	5,4	7,01	981,85	4,05	
Tamkeselt (amont)		lâché de barrage		oued	23			-6,2388889	30,69544441	878	16	1,3	6,7	7,36	878	0	
Tamzmout		RD hors vallée	sol conglomératif et sableux puits avec margelle	puits	24	7	8,55	-6,16111106	30,67702781	872	18	2,7	6,3	6,35	865	1,55	
Tinzouline		RD hors vallée	sol schisteux puits avec margelle	puits	25	8,55	10,6	-6,13388888	30,51738888	829	24	0,63	5,5	6,78	820,45	2,05	
Bni Zoli (aval)		lâché de barrage		oued	26			-5,7338889	30,42327782	769	19	1,2	1,5	7,59	769	0	
Bni Zoli (aval)		RG.Int. Vallée	sol conglomératif et sableux avec margelle	puits	27	5,45	18,55	-5,90536111	30,43002779	775	21	4	3,2	6,9	769,55	13,1	
Bni Zoli (aval)		RG hors vallée	sol schisteux puits avec margelle	puits	28	12,45	23,65	-5,89494442	30,44127775	760	23	3,1	4,9	7,3	747,55	11,2	
Aghlane Fougani		RG hors vallée	sol gresieux puits avec margelle	puits	29	11,9	18,29	-5,95025	30,4694722	793	25	0,75	0,6	7	781,1	6,39	
Aghlane Fougani		RG.Int. Vallée	pas de margelle	puits	30	7,75	12,75	-5,95444445	30,45580558	795	21	4,1	0,2	6,88	787,25	5	
Aghlane Fougani		RG hors vallée	pas de margelle	puits	31	17	23,1	-5,94505553	30,46674999	787	17	2,7	0,4	6,75	770	6,1	
Ouled soulane		RD hors vallée	sol schisteux puits avec margelle	puits	32	12,25	25,65	-6,03800001	30,47508333	808	26	2,7	1,6	6,94	795,75	13,4	
Ouled soulane		RD.Int. Vallée	puits avec margelle	puits	33	8,2	11,2	-6,02272222	30,47063889	803	23	3,8	3,7	6,95	794,8	3	
oued draa		lâché de barrage		oued	34			-6,00430555	30,4564444	784	20	1,2	5,3	7,72	784	0	

Annexe 3 : analyses chromatographique des anions

Sample No.	Sample Name	Fluorure		Chlorure		Nitrite		Bromure		Nitrate		Sulphate		Phosphate	
		Amount mg/l	Amount mg/l	Amount mg/l	Amount mg/l	Amount mg/l	Amount mg/l	Amount mg/l	Amount mg/l						
		ECD_1	ECD_1	ECD_1	ECD_1	ECD_1	ECD_1	ECD_1	ECD_1						
1	Etalon Anion	4,5896	8,8994	14,2894	23,8618	22,0390	25,5277	40,5179							
2	Etalon Anion	4,5876	8,9314	14,3311	23,8166	22,0978	25,5743	40,8139							
91	T1	0,1540	300,9808	0,1182	0,2386	14,8166	520,7566	n.a.							
92	T2	0,4843	107,1496	n.a.	0,3071	28,5760	255,0422	n.a.							
93	T3	0,4898	299,0762	0,0131	0,3461	30,8815	547,8857	n.a.							
94	T4	0,5484	331,0293	0,0692	0,3286	63,4879	522,5504	n.a.							
95	T5	0,3916	606,5499	0,0029	0,2868	7,4713	602,0560	n.a.							
96	T6	0,2703	137,3902	n.a.	0,1093	2,8371	268,0690	n.a.							
97	T7	0,5734	90,3774	n.a.	0,2366	7,1121	441,8185	n.a.							
98	T8	0,3769	410,1699	0,0097	0,2786	2,7963	767,6068	n.a.							
99	T9 d=10	0,3318	1125,2816	1,6004	0,9818	17,7272	994,6905	4,1590							
100	T10	0,1943	137,3156	0,0044	0,1115	2,9469	273,5754	n.a.							
101	T11 d=10	0,2103	279,7433	0,1463	0,4970	176,7519	156,8387	n.a.							
102	T12	0,3012	488,1513	0,0188	0,3597	8,8008	832,6958	n.a.							
103	T13	0,4330	85,4005	0,0405	0,3362	71,4441	68,2704	n.a.							
104	T14 d=10	0,2952	649,4157	0,0130	0,4980	34,7768	877,9962	n.a.							
105	T15	0,4182	132,2434	n.a.	0,4479	1,8713	6,3603	0,8865							
106	T16	0,1869	430,3587	1,6700	0,7221	201,5904	349,4759	0,0813							
107	T17	0,3109	42,3669	0,1658	0,0936	19,0562	64,1076	n.a.							
108	T18	0,2558	145,8970	n.a.	0,1004	2,8910	287,1441	n.a.							
109	T19	0,2678	355,8305	2,5862	0,3237	44,9265	442,6459	6,1608							
110	T20 d=10	0,2681	934,5131	0,5711	0,7149	69,2927	1138,6077	n.a.							
111	T21 d=10	0,3542	453,3705	0,0181	0,3851	27,0481	722,2644	n.a.							
112	T22 d=10	0,2942	537,2725	0,0193	0,4755	28,3186	808,4050	n.a.							
113	T23	0,2453	131,3503	0,0161	0,1014	3,0746	262,3713	n.a.							
114	T24	0,3180	47,2033	0,0301	0,2246	1,7654	1046,6778	n.a.							
115	T25	0,2988	29,3453	0,4360	0,1445	20,6749	54,7484	n.a.							
116	T26	0,2710	150,7045	0,0051	0,1181	2,7522	294,0076	n.a.							
117	T27 d=10	0,4105	876,8640	0,0324	0,5219	26,2887	1075,4147	n.a.							
118	T28 d=10	0,5669	570,4621	n.a.	0,5059	113,2596	606,9776	n.a.							
119	T29	0,6143	36,5078	0,9083	0,1674	25,8372	70,9023	n.a.							
120	T30 d=10	0,2940	725,7819	0,0171	0,5419	19,4620	1002,9223	n.a.							
121	T31	0,4129	503,2657	0,0040	0,4070	1,9413	609,7236	n.a.							
122	T32	0,3640	436,3342	0,3926	0,3518	26,3243	706,0221	0,0677							
123	T33 d=10	0,3690	629,6939	n.a.	0,4179	24,8666	931,2785	n.a.							
124	T34	0,2664	152,7935	n.a.	0,1135	2,7006	294,6917	n.a.							
150	C2	0,0990	5,3525	0,0786	0,1464	5,5492	5,6299	0,1848							
151	C3	0,4937	22,1928	0,3730	0,7407	22,2816	22,2571	0,9631							
152	C4	4,0007	200,3376	3,0001	6,0011	200,3218	200,3229	8,0048							
Average:		0,467	323,836	0,384	0,799	38,945	301,250	4							
Rel.Std.Dev:		151,599 %	153,173 %	479,594 %	361,842 %	285,943 %	103,064 %	255,717 %							

Annexe 4 : analyse chromatographique des cations

Sample No.	Sample Name	Calcium		Magnesium		Potassium		Ammonium		Sodium		Lithium	
		Amount	ECD_1	Amount	ECD_1	Amount	ECD_1	Amount	ECD_1	Amount	ECD_1	Amount	ECD_1
3	Etalon Cations	4,2813		0,1268		4,6076		2,1987		2,9281		0,2561	
89	T1	167,8342		83,7304		8,1808		0,2657		179,9289		0,0163	
90	T2	148,1929		59,3553		3,4310		n.a.		43,1560		0,0180	
91	T3	211,8283		88,1183		6,7673		n.a.		155,1938		0,0352	
92	T4	221,3680		88,9979		7,6922		0,2899		146,9493		0,0164	
93	T5	211,8969		94,5308		7,2742		n.a.		357,3699		0,0246	
94	T6	97,1265		42,8992		5,0762		n.a.		92,2651		0,0071	
95	T7	150,0715		61,0072		9,8239		n.a.		76,0444		0,0449	
96	T8	220,4713		105,4575		6,8612		0,2124		264,3665		0,0211	
97	T9 d=10	605,6832		228,8176		33,5003		17,1472		406,4365		0,0444	
98	T10	97,2468		43,9661		5,0786		n.a.		92,2403		0,0073	
99	T11 d=10	245,1116		25,4021		7,9063		1,6008		76,2017		0,0245	
100	T12	252,8440		114,6748		7,8661		n.a.		293,7350		0,0211	
101	T13	121,8987		36,5362		3,6984		0,4200		45,7252		0,0246	
102	T14 d=10	374,0025		174,1263		9,2066		n.a.		363,0184		0,0315	
103	T15	115,0660		52,8125		13,5536		5,7281		82,6915		0,0259	
104	T16	283,2055		90,1317		5,5079		0,3096		116,4741		0,0273	
105	T17	65,7973		19,3387		2,2458		0,4507		18,1291		0,0110	
106	T18	100,7797		46,3065		5,0139		n.a.		97,0846		0,0076	
107	T19	190,5992		84,8870		30,3860		1,1973		232,7472		0,0190	
108	T20 d=10	430,8584		230,4528		29,7498		4,4846		490,7661		0,0451	
109	T21 d=10	267,5605		137,3034		8,1185		n.a.		316,4240		0,0284	
110	T22 d=10	311,0111		154,2718		8,8980		n.a.		339,5925		0,0305	
111	T23	95,5796		42,8827		5,1394		n.a.		89,1803		0,0069	
112	T24	356,5363		119,2988		8,5959		0,4566		113,1658		0,0608	
113	T25	81,8372		22,1813		1,2580		n.a.		28,6440		0,0127	
114	T26	102,7133		47,0140		5,0130		n.a.		99,9648		0,0080	
115	T27 d=10	324,2446		212,0244		11,3014		n.a.		596,8484		0,0346	
116	T28 d=10	425,0003		121,8677		8,5866		0,1012		167,5085		0,0589	
117	T29	81,5636		25,4555		3,4242		0,4313		47,3622		0,0249	
118	T30 d=10	333,6153		194,3660		12,2070		n.a.		477,5317		0,0393	
119	T31	312,5631		90,8303		3,6301		n.a.		169,4305		0,0559	
120	T32	258,8825		95,2149		6,3037		0,1249		222,9240		0,0320	
121	T33 d=10	313,8243		168,7116		10,3578		n.a.		411,9246		0,0259	
122	T34	101,5243		46,6416		6,4133		0,3069		99,7874		0,0077	
137	C1	4,0233		1,3828		0,6921		0,2165		3,4470		0,0041	
138	C2	100,5396		81,9629		17,5928		4,4956		81,0829		0,1005	
139	C3	199,7297		140,2989		34,9538		9,0025		159,4536		0,1998	
Average:		146,238		69,327		10,292		2,511		161,922		0	
Rel.Std.Dev:		70,683 %		81,448 %		360,542 %		310,034 %		144,575 %		170,242 %	

Annexe 5: analyse volumétrique des bicarbonates

N° ech	Vml(essai 1)	Vml(essai 2)	moyenne(ml)	HCO3-(méq/l)	HCO3-(mg/l)
1	2,5	2,3	2,4	2,4	146,4
2	3,7	3	3,35	3,35	204,35
3	3,5	3,9	3,7	3,7	225,7
4	2,8	2,8	2,8	2,8	170,8
5	3,4	3,7	3,55	3,55	216,55
6	1,8	1,8	1,8	1,8	109,8
7	3,2	3,1	3,15	3,15	192,15
8	3,8	3,6	3,7	3,7	225,7
9	6,2	6	6,1	6,1	372,1
10	1,5	1,7	1,6	1,6	97,6
11	2,3	2,7	2,5	2,5	152,5
12	4,2	3,8	4	4	244
13	3,3	3,8	3,55	3,55	216,55
14	4,3	4,5	4,4	4,4	268,4
15	6	6,4	6,2	6,2	378,2
16	3	2,8	2,9	2,9	176,9
17	1,8	1,7	1,75	1,75	106,75
18	1,7	1,8	1,75	1,75	106,75
19	4,6	4,8	4,7	4,7	286,7
20	3,1	3,2	3,15	3,15	192,15
21	3,6	3,9	3,75	3,75	228,75
22	3,9	4	3,95	3,95	240,95
23	1,8	1,8	1,8	1,8	109,8
24	9,7	10	9,85	9,85	600,85
25	3	2,9	2,95	2,95	179,95
26	1,9	1,8	1,85	1,85	112,85
27	4,1	4	4,05	4,05	247,05
28	2,6	2,4	2,5	2,5	152,5
29	3	3,4	3,2	3,2	195,2
30	4,1	4,1	4,1	4,1	250,1
31	3,4	3,3	3,35	3,35	204,35
32	3,1	3,5	3,3	3,3	201,3
33	3,5	3,2	3,35	3,35	204,35
34	2	1,7	1,85	1,85	112,85

Annexe 6: balance ionique des échantillons

Nom échantillons	Date	Mesures terrain				Mesures laboratoire																Isotopes	
		T°C	pH	χ _{25°C}	% O ₂	pH	HCO ₃ ⁻	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	TOC	SiO ₂	Bal	¹⁸ O	¹³ C
1	T1	23	7,03	2,1			146,4	0,154	300,98	0,118241573	0,238569257	14,81659792	0	520,7565875	167,83	83,73	179,93	8,1808			3%		
2	T2	21	7,29	1,3			204,35	0,4843	107,15	0	0,307097662	28,57596514	0	255,0422367	148,19	59,355	43,156	3,431			8%		
3	T3	19	6,82	1,4			225,7	0,4898	299,08	0,013103655	0,346127859	30,88145773	0	547,8857071	211,83	88,118	155,19	6,7673			1%		
4	T4	25	6,95	2,2			170,8	0,5484	331,03	0,069228295	0,328645598	63,48789289	0	522,5504032	221,37	88,998	146,95	7,6922			2%		
5	T5	22	6,87	3			216,55	0,3916	606,55	0,002902524	0,286773813	7,471265494	0	602,0560474	211,9	94,531	357,37	7,2742			1%		
6	T6	18	6,97	1,2			109,8	0,2703	137,39	0	0,109304055	2,83709908	0	268,0689635	97,126	42,899	92,265	5,0762			5%		
7	T7	26	6,93	1,4			192,15	0,5734	90,377	0	0,236647209	7,1120806	0	441,818508	150,07	61,007	76,044	9,8239			3%		
8	T8	22	6,9	2,7			225,7	0,3769	410,17	0,00969609	0,278604126	2,796256152	0	767,6068095	220,47	105,46	264,37	6,8612			0%		
9	T9 d=10	20	7,21	5,2			372,1	0,3318	1125,3	1,600391416	0,981803205	17,72715233	4,158964091	994,6904942	605,68	228,82	406,44	33,5			7%		
10	T10	19	7,52	1,2			97,6	0,1943	137,32	0,00439408	0,111513939	2,94693662	0	273,5754164	97,247	43,966	92,24	5,0786			6%		
11	T11 d=10	25	6,89	1,8			152,5	0,2103	279,74	0,146341007	0,497009055	176,7519496	0	156,8387138	245,11	25,402	76,202	7,9063			4%		
12	T12	21	6,86	3			244	0,3012	488,15	0,018819852	0,359673422	8,800764639	0	832,6957926	252,84	114,67	293,73	7,8661			0%		
13	T13	22	7,28	1			216,55	0,433	85,401	0,040507283	0,336167066	71,44408448	0	68,2704405	121,9	36,536	45,725	3,6984			13%		
14	T14 d=10	21	6,72	3,8			268,4	0,2952	649,42	0,012981487	0,498023557	34,77675404	0	877,996174	374	174,13	363,02	9,2066			8%		
15	T15	22	7,4	1,3			378,2	0,4182	132,24	0	0,447925823	1,871295818	0,886463679	6,360304625	115,07	52,813	82,692	13,554			16%		
16	T16	23	7,04	2,5			176,9	0,1869	430,36	1,66995749	0,722087415	201,590381	0,081323833	349,4758502	283,21	90,132	116,47	5,5079			2%		
17	T17	25	6,96	0,54			106,75	0,3109	42,367	0,165778056	0,093568074	19,05617193	0	64,10761762	65,797	19,339	18,129	2,2458			11%		
18	T18	20	7,42	1,2			106,75	0,2558	145,9	0	0,100398461	2,890995895	0	287,1441339	100,78	46,306	97,085	5,0139			5%		
19	T19	18	7,36	2,5			286,7	0,2678	355,83	2,586159455	0,323737455	44,92649681	6,160784183	442,6458723	190,6	84,887	232,75	30,386			5%		
20	T20 d=10	19	6,84	4,8			192,15	0,2681	934,51	0,571143631	0,714851652	69,29274115	0	1138,607698	430,86	230,45	490,77	29,75			7%		
21	T21 d=10	21	6,91	3,2			228,75	0,3542	453,37	0,01810522	0,385052117	27,04806873	0	722,264389	267,56	137,3	316,42	8,1185			9%		
22	T22 d=10	22	7,01	3,4			240,95	0,2942	537,27	0,019341231	0,475527573	28,31856648	0	808,4050265	311,01	154,27	339,59	8,898			9%		
23	T23	16	7,36	1,3			109,8	0,2453	131,35	0,016069182	0,101406672	3,074590117	0	262,3713065	95,58	42,883	89,18	5,1394			5%		
24	T24	18	6,35	2,7			600,85	0,318	47,203	0,030098353	0,224600985	1,765385934	0	1046,67783	356,54	119,3	113,17	8,5959			0%		
25	T25	24	6,78	0,63			179,95	0,2988	29,345	0,435988858	0,144472855	20,6748805	0	54,74839193	81,837	22,181	28,644	1,258			15%		
26	T26	19	7,59	1,2			112,85	0,271	150,7	0,005144157	0,118079101	2,752180977	0	294,0075941	102,71	47,014	99,965	5,013			5%		
27	T27 d=10	21	6,9	4			247,05	0,4105	876,86	0,032403412	0,521868277	26,28874971	0	1075,414724	324,24	212,02	596,85	11,301			7%		
28	T28 d=10	23	7,3	3,1			152,5	0,5669	570,46	0	0,505931165	113,2595962	0	606,977573	425	121,87	167,51	8,5866			8%		
29	T29	25	7	0,75			195,2	0,6143	36,508	0,908274443	0,167407866	25,83717474	0	70,90229333	81,564	25,456	47,362	3,4242			15%		
30	T30 d=10	21	6,88	4,1			250,1	0,294	725,78	0,017109224	0,54186143	19,46203649	0	1002,922259	333,62	194,37	477,53	12,207			8%		
31	T31	17	6,75	2,7			204,35	0,4129	503,27	0,003976429	0,40702037	1,941278083	0	609,723617	312,56	90,83	169,43	3,6301			0%		
32	T32	26	6,94	2,7			201,3	0,364	436,33	0,392555854	0,351811231	26,32433474	0,067680316	706,0221456	258,88	95,215	222,92	6,3037			0%		
33	T33 d=10	23	6,95	3,8			204,35	0,369	629,69	0	0,417858268	24,86655589	0	931,2784919	313,82	168,71	411,92	10,358			8%		
34	T34	20	7,72	1,2			112,85	0,2664	152,79	0	0,113530949	2,700618135	0	294,6917398	101,52	46,642	99,787	6,4133			4%		